

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**IZRADA VODILJA ZA SINTEZU BIOMATERIJALA U
MEDICINSKIM KONSTRUKCIJAMA**

Marin Androlić

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**IZRADA VODILJA ZA SINTEZU BIOMATERIJALA U
MEDICINSKIM KONSTRUKCIJAMA**

Mentor:

Izv.prof.dr.sc. Aleksandar Sušić

Student:

Marin Androlić

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja koja sam stekao tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru, prof.dr.sc. Aleksandru Sušiću na savjetima, podršci i iskazanom strpljenju tijekom izrade ovog završnog rada.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji za podršku i razumijevanje tijekom dosadašnjeg studiranja.

Marin Androlić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

| | |
|-------------------------------------|-------------------|
| Sveučilište u Zagrebu | |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | 19-09-2016 Prilog |
| Klasa: | 602-04/16-6/3 |
| Ur.broj: | 15-1703-16-314 |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marin Androlić**

Mat. br.: **0035191257**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Izrada vodilja za sintezu biomaterijala u medicinskim konstrukcijama**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Guidelines creation for the synthesis of materials in medical designs**

Opis zadatka:

Pri konstrukcijskoj razradi medicinskih konstrukcija često nailazimo na zahtjev primjene biomaterijala, odnosno materijala koji mogu biti primijenjeni u biološkom okruženju, te se pritom treba udovoljiti nizu zahtjeva, počevši sa biokompatibilnošću. Pored toga, poznavanje uvjeta primjene medicinske konstrukcije navodi ne samo na pravilan izbor materijala, već i na specifična svojstva koja takva konstrukcija treba posjedovati.

U okviru ovog rada je potrebno izraditi sustav vodilja s ciljem omogućavanja izbora odgovarajućeg materijala prema očekivanim svojstvima i namjeni, imajući u vidu iznimno velik broj uvjeta primjene materijala u svrhu konstruiranja medicinskih konstrukcija. Obzirom na složenost i težinu ovog zadatka, u radu je potrebno:

- Navesti grupe materijala, te definirati kriterije pripadnosti skupini biomaterijala;
- Istaknuti posebna svojstva koja materijali za primjenu u medicinskim konstrukcijama trebaju posjedovati, s osvrtom na uvjete biološkog okruženja;
- Utvrditi vrste podjela i moguće razvrstavanje prema karakteristikama materijala;
- Utvrditi način odnosno vodilje koje omogućavaju sintezu materijala u konstruiranju medicinskih konstrukcija;
- Istaknuti zaključke i diskutirati utvrđene vodilje s osvrtom na moguću primjenu u CAD okruženju.

Opseg dokumentacije i cjelovitosti vodilja dogovoriti tijekom izrade rada. Svu dokumentaciju izraditi pomoću računala. U radu navesti korištenu literaturu, kao i eventualnu pomoć.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016

2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.

3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.

3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:

Izv.prof.dr.sc. Aleksandar Sušić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| SADRŽAJ | 2 |
| POPIS SLIKA | 3 |
| POPIS TABLICA | 4 |
| POPIS OZNAKA | 5 |
| POPIS KRATICA | 6 |
| SAŽETAK | 7 |
| 1. UVOD | 9 |
| 2. KLASIFIKACIJA BIOMATERIJALA | 10 |
| 2.1. Metali | 12 |
| 2.1.1. Čelici | 12 |
| 2.1.1. Kobalt-krom legure | 15 |
| 2.1.3. Titan i legure titana | 18 |
| 2.2. Polimeri i hidrogelovi | 21 |
| 2.2.1. Polimeri | 21 |
| 2.2.2. Hidrogelovi | 29 |
| 2.3. Keramika | 31 |
| 2.4. Kompozitni materijali | 34 |
| 3. VODILJE ZA SINTEZU BIOMATERIJALA | 38 |
| 3.1. Karte svojstava materijala | 43 |
| 4. PRIMJENA BIOMATERIJALA U CAD OKRUŽENJU | 48 |
| 5. ZAKLJUČAK | 50 |
| 6. LITERATURA | 51 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 2.1.a) Metalne ploče i vijci za fiksaciju slomljenih kostiju tijekom njihova zacjeljenja..... | 20 |
| Slika 2.1.b) Rendgenske slike | 20 |
| Slika 2.2 Umjetni zglobovi koljena..... | 28 |
| Slika 2.3 Temperaturno osjetljiv hidrogel..... | 30 |
| Slika 2.4 Modul elastičnosti i vlačna čvrstoća različitih materijala..... | 35 |
| Slika 3.1. Karta svojstava za modul elastičnosti i gustoću..... | 44 |
| Slika 3.2. Karta svojstava: čvrstoća-modul elastičnosti..... | 45 |
| Slika 3.3. Karta svojstava: lomna žilavost-čvrstoća..... | 46 |
| Slika 3.4. Karta svojstava: toplinska rastezljivost-normalizirana čvrstoća..... | 47 |
| Slika 4.1. Interaktivna animacija..... | 49 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 2.1. Grupe biomaterijala i njihove medicinske primjene..... | 12 |
| Tablica 2.2. Mehanička svojstva nehrđajućeg čelika za implantate..... | 13 |
| Tablica 2.3. Sastav, svojstva i primjena X15Cr13 (Č4171)..... | 13 |
| Tablica 2.4. Sastav, svojstva i primjena X15CrMo13..... | 14 |
| Tablica 2.5. Sastav, svojstva i primjena X12CrNi18-8 (Č4571)..... | 14 |
| Tablica 2.6. Sastav, svojstva i primjena X10CrNiMoTi18-10 (Č4571)..... | 14 |
| Tablica 2.7. Sastav, svojstva i primjena X10CrNiMoNb18-10 (Č4571)..... | 15 |
| Tablica 2.8. Mehanička svojstva Co-Cr legura..... | 16 |
| Tablica 2.9. Kemijski sastav kobalt krom legura koje se koriste u medicini..... | 17 |
| Tablica 2.10. Svojstva i primjena Co-Cr legura..... | 17 |
| Tablica 2.11. Fizikalna i mehanička svojstva titana..... | 18 |
| Tablica 2.12. Kemijski sastav cpTi i Ti legura..... | 19 |
| Tablica 2.13. Svojstva i primjena Ti6Al4V legure..... | 20 |
| Tablica 2.14. Podjela polimera s obzirom na postanak..... | 21 |
| Tablica 2.15. Podjela polimera s obzirom na vrstu monomera u makromolekuli..... | 22 |
| Tablica 2.16. Podjela polimera s obzirom na građu makromolekula..... | 22 |
| Tablica 2.17. Podjela polimera prema njihovom ponašanju pri povišenim temperaturama..... | 23 |
| Tablica 2.18. Prednosti i nedostaci polimernih materijala..... | 24 |
| Tablica 2.19. Primjena nekih polimera u medicini..... | 24 |
| Tablica 2.20. Neki od polimera koji se upotrebljavaju pri izradi lijekova..... | 25 |
| Tablica 2.21. Svojstva nekih polietilena i polipropilena..... | 25 |
| Tablica 2.22. Svojstva nekih polimera i njihova primjena u medicini..... | 26 |
| Tablica 2.23. Primjena nekih polimera na određene dijelove ljudskog tijela..... | 33 |
| Tablica 2.24. Neka od fizikalnih svojstava Al_2O_3 keramike..... | 33 |
| Tablica 2.25. Predstavnici biokeramike, njihova svojstva i primjena..... | 34 |
| Tablica 2.26. Primjena nekih biokompozita..... | 37 |
| Tablica 3.1. Neki od biomaterijala i njihova medicinska primjena..... | 40 |
| Tablica 3.2. Svojstva nekih biomaterijala..... | 43 |

POPIS OZNAKA

| OZNAKA | JEDINICA | ZNAČENJE |
|------------|-------------------|-------------------------|
| σ | MPa | naprezanje |
| σ_M | MPa | vlačna čvrstoća |
| A | % | istezljivost |
| E | GPa | modul elastičnosti |
| ρ | kg/m ³ | gustoća |
| α | K ⁻¹ | toplinska rastezljivost |
| F | N | sila |
| m | kg | masa |
| μ | / | Poissonov koeficijent |

POPIS KRATICA

PE- polietilen

PP- polipropilen

PVC- poli(vinil-klorid)

PS- polistiren

PA- poliamid

PMMA- poli(metil-metakrilat)

PVA- polivinil-alkohol

PVP- polivinil-pirolidon

PEG- polietilen-glikol

PAA- poliakrilna kiselina

PTFE- poli(tetrafluoretilen)

PDMS- Poli(dimetil-siloksan)

UHMWPE- polietilen sa vrlo visokom molekularnom masom

SAŽETAK

U okviru ovog rada bilo je potrebno izraditi sustav vodilja s ciljem omogućavanja izbora odgovarajućeg materijala prema očekivanim svojstvima i namjeni .

Kao u svim granama inženjerstva, pa tako i u biomedicinskom inženjerstvu, odabir materijala koji će se primijeniti za izradu medicinskih konstrukcija, jedan je od temeljnih i najvažnijih koraka. Danas postoje brojne vrste materijala koje su pogodne za izradu implantata s obzirom na svoja specifična svojstva te će se vrlo često naći velik broj različitih materijala koji bi mogli odgovarati istoj svrsi. Posao inženjera je da osim samog dizajna i proračuna implantata ili proteze odabere i najpogodniji materijal. Često puta to nije nimalo lagani dio zadatka jer osim što materijal treba udovoljiti određenim zahtjevima konstrukcije (mehanička svojstva materijala), mora biti i relativno dostupan na tržištu, odnosno njegova cijena ne bi smjela biti previsoka. Također njegova kemijska svojstva moraju zadovoljiti određene zahtjeve, prije svega uvjet biokompatibilnosti. Iz tih razloga išlo se u izradu ovog rada kako bi se olakšao taj važan proces odabira te kako bi se pojedini materijali istih ili sličnih svojstava mogli međusobno uspoređivati. Dakako valja naglasiti da ovaj rad ne obuhvaća i ne navodi sve vrste i podvrste materijala korištenih u današnjoj medicini prvenstveno zbog njihovog velikog broja i raširenosti primjene u različitim granama medicinskog bioinženjerstva, kao i spoznaje da se gotovo na svakodnevnoj bazi pronalaze ili sintetiziraju nove vrste materijala ili se pak usavršavaju svojstva već postojećih.

U radu su navedene osnovne skupine biomaterijala koje su danas najčešće u upotrebi pri čemu je svaka ta pojedina skupina pobliže opisana (općenite informacije vezane uz svaku tu grupu kao i njezina najčešća primjena u medicini). Za svaku skupinu biomaterijala, tablično su navedeni njezini glavni predstavnici sa pripadnim svojstvima.

U radu su dane vodilje (također tablično) koje omogućavaju sintezu materijala u konstruiranju medicinskih konstrukcija prvenstveno s obzirom na njihova svojstva i primjenu. Također je dotaknuta tema primjene tih vodilja u CAD okruženju , točnije na koji način bi se ti podaci iskoristili u različitim današnjim softverima za izradu konstrukcija.

SUMMARY

This paper objective is to create guidelines for the synthesis of materials in medical designs.

Like in every branch of engineering, the selection of material that will be used for medical purposes is one of the most important and basic steps. Today there are many kinds of materials that are suitable for the creation of implants according to their specific properties, and often a very large amount of materials that suit same purpose can be found. Engineer's job is not only to design implants and make calculations for it but also to choose the most appropriate material. That is not easy part of the assignment at all, because not only that chosen material must satisfy certain construction requirements (mechanical properties of material), but it also needs to be available on the market. Its value must not be too high. Also, its chemical properties must meet certain requirements, like biocompatibility. For this reasons this paper is made, so that important choosing process can be eased, and also for comparing individual material with same or similar properties. It is important to emphasize that this paper does not include all types of materials used in modern medicine, mainly because there are a lot of them and because they can be used in different branches of medical bioengineering, and also because almost on daily basis can be found or fabricate new types of materials.

In this paper are listed basic groups of biomaterials that are commonly in use today, wherein is each of these individual groups closely described (general informations associated with each this group, as well as its most common application in medicine). For each group of the materials are listed its main representatives with its associated properties.

Guidelines presented in this paper allow synthesis of materials in medical designs, primarily according to their properties and use. Application of this guidelines in CAD environment is also commented.

1. UVOD

Kroz stoljeća ljudske povijesti, brojne vrste materijala korištene su u različite medicinske svrhe, primjerice za tretiranje zadobivenih ozljeda, kao pomagala pri hodu i kretanju, ali i kao potpuna ili djelomična zamjena određenih udova, organa i drugih dijelova čovjekova tijela. Upravo te vrste materijala koje se koriste za navedene zadaće nazivamo biomaterijalima. Njihova točna definicija glasi: „Biomaterijal je tvar načinjena tako da se sama ili kao dio kompleksnog sustava, u kontroliranoj interakciji s organizmom, može koristiti za regulaciju terapijske ili dijagnostičke procedure u medicini ili veterini.“ Važno je napomenuti da oni prije svega moraju zadovoljiti uvjet biokompatibilnosti, što znači da moraju u potpunosti biti prihvaćeni u čovjekovu tijelu, odnosno da osim što obavljaju željenu funkciju moraju s ostalim organima biti kompatibilni i činiti skladnu cjelinu. Nikako ne bi smjeli izazvati infekcije, te njihov položaj i rad bi trebao biti što prirodniji. Upotreba biomaterijala brzo se povećala krajem 19. stoljeća. Prvi metalni uređaji korišteni kod prijeloma kostiju u svrhu njihove privremene zamijene ili njihova ojačanja upotrebljavani su na prijelazu iz 19. u 20. stoljeće. Prva potpuna ugradnja umjetnog kuka izvršena je 1938. godine, a 1950-ih i 1960-ih godina prošlog stoljeća uvedeni su polimerni materijali kao zamjena za rožnicu ljudskog oka, ali i kao zamjena za određene dijelove i vrste krvnih žila. Danas se biomaterijali značajno koriste za izradu proteza i implantata koje služe kao zamjena ili potpora za gotovo sve dijelove tijela. Važno je i napomenuti da se sve više koriste i za uzgajanje staničnih kultura, za testiranje krvnih proteina u kliničkim laboratorijima, kod procesiranja biomolekula u biotehnologiji ...

Daljnjim razvojem tehnologije i pronalaskom novih materijala postavljaju se stroži zahtjevi glede sigurnosti, pouzdanosti, nosivosti, trajnosti, troškova i sl.

Zbog svega navedenoga izbor biomaterijala je danas mnogo kompleksniji problem nego što je bio u prošlosti.

U nastavku ovoga rada navesti će se grupe materijala te kriteriji pripadnosti određenoj skupini biomaterijala. Istaknuti će se posebna svojstva koja materijali za primjenu u medicinskim konstrukcijama trebaju posjedovati. Utvrditi će se vrste podjela i moguće razvrstavanje prema karakteristikama materijala. Spomenuti će se i načini koji omogućavaju sintezu materijala u konstruiranju medicinskih konstrukcija.

2. KLASIFIKACIJA BIOMATERIJALA

Biomaterijali se mogu podijeliti u nekoliko velikih skupina:

1. Metali
2. Keramika i staklo
3. Polimeri i hidrogelovi
4. Prirodni materijali
5. Kompoziti

U sljedećoj tablici napravljen je prikaz grupa materijala i njihove uporabe u današnjoj medicini:

| GRUPA MATERIJALA | TREKUTNA UPORABA U MEDICINI |
|---|--|
| <p><u>Metali:</u></p> <p><i>Nehrđajući čelici</i></p> <p><i>Titan i titanove legure</i></p> <p><i>Kobalt- krom legure</i></p> <p><i>Zlato</i></p> <p><i>Srebro</i></p> <p><i>Platina</i></p> | <p>-artroplastika (kirurški zahvat kojim se oblikuje zglobov, radi se o oblikovanju traumatski,upalno ili degenerativno promijenjenog zglobova pomoću umjetnih zglobova), pločice za fiksaciju prijeloma kostiju, izrada srčanih zalistaka, elektroda...</p> <p>-artroplastika, izrada zubnih mostova i implantata te koronarnih stentova</p> <p>-artroplastika, pločice za fiksaciju prijeloma kostiju</p> <p>-zubne plombe i krune, elektrode</p> <p>-žice za elektrostimulator srca („pacemaker“), dentalni amalgami (slitina žive s jednom ili više kovina i dosad najčešće korišten materijal za izradu ispuna na stražnjim zubima)</p> <p>-elektrode, uređaji za živčanu stimulaciju</p> |

| | |
|-----------------------------------|--|
| <u>Keramika:</u> | |
| <i>Aluminijski oksidi</i> | -implantati kuka, zubni implantati, umjetna pužnica (kohlearni implantat-sofisticirano elektronično slušno pomagalo koje se ugrađuje pacijentu ispod stražnje strane uha, pod kožom) |
| <i>Cirkonij</i> | -implantati kuka |
| <i>Kalcijev fosfat</i> | -površinski premazi po cjelokupnom umjetnom zglobu, umjetne kosti |
| <i>Kalcijev sulfat</i> | - umjetne kosti |
| <i>Ugljik</i> | -premazi na srčanom zalisku, ortopedski implantati |
| <i>Staklo</i> | -punila za stomatološke materijale, umjetne kosti |
| <u>Polimeri:</u> | |
| <i>Najlon</i> | -kirurški šavovi, gastrointestinalni segmenti, trahealne cijevi |
| <i>Silikonska guma</i> | -spojevi između prstiju, umjetna koža, implantati grudi, intraokularne leće, kateteri |
| <i>Poliester</i> | -resorptivni konci (razgrađuju se), fiksacija prijeloma, obloge za kožne rane, uređaji za primjenu lijeka |
| <i>Polietilen (PE)</i> | -implantati koljena i kuka, umjetne tetive i ligamenti, sintetički vaskularni transplantati, proteze, implantati lica |
| <i>Polimetilmetakrilat (PMMA)</i> | -koštani cement, intraokularne leće |
| <i>Polivinilklorid (PCV)</i> | -cijevi, proteze lica |

| | |
|---|---|
| <u>Prirodni materijali:</u> | |
| <i>Kolagen i gelatin</i> | -plastična kirurgija, zavoji za rane, tkivni inženjering |
| <i>Celuloza</i> | -dostava lijekova |
| <i>Hitin</i> | -obloge za rane, dostava lijekova |
| <i>Keramika ili demineralizirana keramika</i> | -umjetne kosti |
| <i>Alginat</i> | -dostava lijekova, inkapsulacija stanica |
| <i>Hijaluronska kiselina</i> | -postoperativna prevencija adhezije, očna i ortopedska maziva, dostava lijekova |

Tablica 2.1. Grupe biomaterijala i njihove medicinske primjene [1]

2.1. METALI

Metali su se kao biomaterijali prvi počeli koristiti od svih gore navedenih skupina. Također čine i jednu od najvećih i najraznovrsnijih skupina. U metalne biomaterijale spadaju: čelici, titan i njegove legure, kobalt-krom legure...

Metal se općenito upotrebljava kao biomaterijal zbog svoje dobre električne i toplinske vodljivosti. Neki metali se najčešće koriste kao zamjena za kuk i spojeve u koljenu. Upotrebljavaju se i kao implantati u oralnoj kirurgiji...

2.1.1. ČELICI

Općenito o čelicima:

Čelik je metastabilno kristalizirana legura željeza i ugljika ($<2\%$ C), uz prisutne pratioce (Si, Mn) i nečistoće (P, S i ostali) i uz eventualni dodatak jednog ili više legiranih elemenata. Čelici se nakon lijevanja taljevine podešenog sastava u kalupe (kolike) oblikuju postupcima deformiranja (valjanjem, prešanjem, kovanjem i sl.) u željeni oblik poluproizvoda (limova, traka, šipki, cijevi, profila i sl.)

Čelici su danas najvažniji tehnički materijali u proizvodnji i primjeni. Svjetska proizvodnja iznosi više od 900 milijuna tona, što je više od 50% od ukupne proizvodnje svih tehničkih materijala, a deset puta više od mase svih proizvedenih metala i njihovih legura.

Čelici kao biomaterijali:

Vanadijski čelik je prva metalna legura stvorena specijalno za ljudsku upotrebu. Korišten je za izradu ploča kod prijeloma kostiju (Šermanove ploče). Danas je zamijenjen određenim nehrđajućim čelicima zbog njihovih boljih svojstava. Napušten je zbog neodgovarajuće otpornosti na koroziju *in vivo*.

Nehrđajući čelici

Prvi nehrđajući čelik šire upotrebljavan za izradu implantata bio je **18-8** (tip **302** u modernoj klasifikaciji). Taj čelik je jači i otporniji na koroziju od vanadijskog čelika. Kasnije je uveden **18-8 Mo nehrđajući čelik** (poznat kao tip **316**). Takav čelik sadrži mali udio molibdena radi povećanja otpornosti na koroziju u slanoj vodi. 1960-ih godina udio ugljika u nehrđajućem čeliku tipa 316 smanjen je sa 0,08 % na 0,03 % (tzv. tip **316L** nehrđajućeg čelika) radi bolje korozivne otpornosti. Minimalna efektivna koncentracija kroma u nehrđajućim čelicima je 11 % iako je reaktivan element, ali se Cr može (kao i njegove legure) pasivizirati da bi dao izuzetnu otpornost čelika na koroziju.

Austenitni nehrđajući čelici imaju najširu primjenu u proizvodnji implantata. Važno je i napomenuti da ova grupa nehrđajućih čelika ima veću otpornost na trošenje te nema magnetna svojstva.

Okvirna mehanička svojstva nehrđajućeg čelika za implantate:

(Napomena: navedene vrijednosti variraju za svaki navedeni nehrđajući čelik prvenstveno zbog različitih udjela legiranih elemenata)

| Način obrade | Vlačna čvrstoća (MPa) | Čvrstoća kod popuštanja (MPa) | Istezljivost (%) | Tvrdoća (Rockwell) |
|----------------------|-----------------------|-------------------------------|------------------|--------------------|
| Kaljeno | 485 | 172 | 40 | 95 |
| Hladna obrada | 860 | 690 | 12 | / |

Tablica 2.2. Okvirna mehanička svojstva nehrđajućeg čelika za implantate [2]

X15Cr13 (Č4171)

| ELEMENT | UDIO (%) | SVOJSTVA | PRIMJENA |
|-----------|-----------|--|---|
| C | 0.12-0.17 | -korozijski postojan martenzitno-feritni čelik | -primjenjuje se za izradu kirurških instrumenata, ali i za izradu osovine,svornjaka, ventilskih vretena,lopatice turbina (do 500°C) |
| Si | max 1 | | |
| Mn | max 1 | | |
| P | max 0.04 | | |
| S | max 0.015 | | |
| Cr | 12-14 | | |

Tablica 2.3. Sastav, svojstva i primjena X15Cr13 (Č4171) [2]

X15CrMo13

| ELEMENT | UDIO (%) | SVOJSTVA | PRIMJENA |
|-----------|-------------|--|--|
| C | 0.12-0.17 | -otporan na oksidirajuće kiseline i pri povišenim temperaturama (od 300 do 500 °C) | -primjenjuje se za izradu kirurških instrumenata, te za izradu osovina, stapajica, ventila, turbinskih lopatica kao i za izradu toplo opterećenih opruga |
| Si | <1.00 | | |
| Mn | <1.00 | | |
| Cr | 12.00-17.00 | | |
| Mo | 1.00-1.30 | | |

Tablica 2.4. Sastav, svojstva i primjena X15CrMo13 [2]

X12CrNi18-8 (Č4571)

| ELEMENT | UDIO (%) | SVOJSTVA | PRIMJENA |
|-----------|-------------|--|--|
| C | ≤ 0.15 | -austenitno-feritni čelik s niskim udjelom ferita (<10%) -standardni tip čelika -primjenjiv je do 300 °C | -u ortopediji, predmeti u kućanstvu, aparati i uređaji u prehrambenoj industriji, u mljekarama, u pivovarama |
| Si | ≤ 1.00 | | |
| Mn | ≤ 2.00 | | |
| P | ≤ 0.045 | | |
| S | ≤ 0.030 | | |
| Ni | 6.00-8.00 | | |
| Cr | 16.00-18.00 | | |
| N | ≤ 0.10 | | |

Tablica 2.5. Sastav, svojstva i primjena X12CrNi18-8 (Č4571) [2]

X10CrNiMoTi18-10 (Č4571)

| ELEMENT | UDIO (%) | SVOJSTVA | PRIMJENA |
|-----------|-----------|---|---|
| C | max 0.1 | - austenitno-feritni čelik s niskim udjelom ferita (<10%) -posebno otporan na neoksidirajuće kiseline i medije s halogenidima -toplinska obrada nakon zavarivanja je nepotrebna | -industrija tekstila, sulfata, celuloze, masnih kiselina, gume, boja, uređaja za medicinu, fotografiju i plastične mase |
| Si | max 1 | | |
| Mn | max 2 | | |
| P | max 0.045 | | |
| S | max 0.03 | | |
| Cr | 16.5-18.5 | | |
| Ni | 12-14.5 | | |
| Mo | 2.5-3 | | |
| Ti | (5x %C) | | |

Tablica 2.6. Sastav, svojstva i primjena X10CrNiMoTi18-10 (Č4571) [2]

X10CrNiMoNb18-10 (Č4571)

| ELEMENT | UDIO (%) | SVOJSTVA | PRIMJENA |
|-----------|-----------|--|---|
| C | max 0.1 | -austenitno-feritni čelik s niskim udjelom ferita (<10%) -posebno otporan na neoksidirajuće kiseline i medije s halogenidima -toplinska obrada nakon zavarivanja je nepotrebna | -industrija tekstila, sulfata, celuloze, masnih kiselina, gume, boja, uređaja za medicinu, fotografiju i plastične mase |
| Si | max 1 | | |
| Mn | max 2 | | |
| P | max 0.045 | | |
| S | max 0.03 | | |
| Cr | 16.5-18.5 | | |
| Ni | 12-14.5 | | |
| Mo | 2.5-3 | | |
| Ti | (5x%C) | | |
| Nb | 0.8 | | |

Tablica 2.7. Sastav, svojstva i primjena X10CrNiMoNb18-10 (Č4571) [2]

2.1.2. KOBALT-KROM LEGURE**Općenito o kobaltu i kromu te kobalt-krom legurama:**

Kobalt je element sivkaste boje, žilav je i vrlo tvrd. Ima feromagnetična svojstva i otrovan je metal. Gustoća mu iznosi 8900 kg/m^3 , talište mu je na 1495°C , a vrelište na 2927°C . Zbog svoje strukturne građe kobalt je dobro toplo oblikovljiv, ali ograničeno hladno oblikovljiv jer se deformacija ostvaruje, kao i kod drugih metala (Ti, Mg i Zn) s HCP rešetkom, samo klizanjem baznim ravninama heksagonske jedinične ćelije. Čisti kobalt je beznačajan kao konstrukcijski materijal. Koristi se uglavnom njegov izotop ^{60}Co kao izvor zračenja u medicini, za mjerenja istrošenja, gustoće, debljine i za ispitivanja bez razaranja odljevaka i zavara.

Kobalt je važan kao legirni element za proizvodnju trajnih magnetnih materijala, sinteriranih tvrdih metala, materijala za navarivanje otpornih na trošenje, brzoreznih čelika, zubarskih legura i legura za implantate u kirurgiji.

Krom je srebrnobijeli metal plavkasta odsjaja. Nema mirisa ni okusa, vrlo je tvrd. Pogodan je za kovanje, a u dodiru s kisikom, zrakom ili vodenom parom prevlači se vrlo tankim slojem oksida otpornim na koroziju. Nije otrovan, ali su otrovni njegovi spojevi, posebice kromna kiselina i alkalijski dikromat. Gustoća kroma iznosi 7150 kg/m^3 , dok mu je talište na 1907°C , a vrelište na 2671°C .

Razlikuju se dva osnovna tipa Co-Cr legura:

- 1.) Lijewane Co-Cr legure
- 2.) Kovane Co-Cr legure

Co-Cr legure se najčešće koriste pri izradi umjetnih zglobova, uključujući zglobove koljena i kukova zbog visoke otpornosti na trošenje i zbog biokompatibilnosti. Co-Cr legure su sklone otpornosti na koroziju, što smanjuje komplikacije s tkivom koje okružuje implantat i kemijski su inertne pa smanjuju mogućnost iritacije i alergijske reakcije.

Co-Cr legure imaju široku primjenu u proizvodnji stent-ova i ostalih kirurških implantata s obzirom da ove legure pokazuju odličnu biokompatibilnost s krvlju i mekim tkivima.

U ortopedskoj industriji se koriste legure sastava: kobalt s 27-30 % kroma, 5-7 % molibdena i ostalih elemenata ograničenih udjela. Osim Co-Cr-Mo legure, za implantate se također koristi Co-Ni-Cr-Mo legura.

Legure Co-Cr se koriste i u dentalnoj medicini jer imaju visoki modul elastičnosti i otpornost na zamor materijala. Koriste se kod izrade zubnih mostova i kruna.

Važno je skrenuti pažnju na moguću toksičnost oslobođenih Ni iona kod CoNiCr legura te njezinih ograničenih tanih svojstava. Zbog tih razloga CoCrMo legure su uobičajeno dominantne legure kod potpune artroplastike (ugradnje umjetnog zgloba).

Mehanička svojstva Co-Cr legura:

| Mehanička svojstva | CoCrMo lijevano | CoCrW Ni kovano | CoNiCrMo hladna obrada starenje |
|---------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|
| Vlačna čvrstoća (MPa) | 655 | 860 | 1793 |
| Čvrstoća popuštanja (MPa) | 450 | 310 | 1585 |
| Istezanje (%) | 8 | 10 | 8 |
| Čvrstoća umora (MPa) | 310 | / | / |

Tablica 2.8. Mehanička svojstva Co-Cr legura [6]

Kemijski sastav kobalt- krom legura koje se koriste u medicini:

| Element | CoCrMo | | CoNiCrMo | |
|-----------|--------|------|----------|-------|
| | min. | max. | min. | max. |
| Cr | 27,0 | 30,0 | 19,0 | 21,00 |
| Mo | 5,0 | 7,0 | 9,0 | 10,5 |
| Ni | -- | 2,5 | 33,0 | 37,0 |
| Fe | -- | 0,75 | -- | 1,0 |
| C | -- | 0,35 | -- | 0,025 |
| Si | -- | 1,00 | -- | 0,15 |
| Mn | -- | 1,00 | -- | 0,15 |
| W | -- | -- | -- | -- |
| P | -- | -- | -- | 0,015 |
| S | -- | -- | -- | 0,010 |
| Ti | -- | -- | -- | 1,0 |
| Co | | | -- | |

Tablica 2.9. Kemijski sastav kobalt krom legura koje se koriste u medicini [6]

Krom je dodan radi poboljšanja korozijske otpornosti, molibden i volfram služe kao karbidotvorci , a dodatci ugljika i dušika povećavaju snagu (izdržljivost).

Svojstva i primjena Co-Cr legura:

| LEGURA | SVOJSTVA | PRIMJENA |
|-----------------|--|--|
| CoCrMo | -visoka mehanička svojstva -visok modul elastičnosti -dobra korozijska otpornost -biokompatibilnost (moguća toksičnost Ni iona kod CoNiCrMo legura) | -umjetni zglobovi, dentalna medicina → ortodonske žice -filtri krvnih ugrušaka |
| CoNiCrMo | -visoka otpornost na umor -visoka gustoća (8,8 g/cm ³) | -izrada koronarnog stenta, izrada umjetnih zglobova (jako opterećenih) → umjetni kuk -kabeli za ortopedsku upotrebu -žice (kabel) defibrilatora -filtri krvnih ugrušaka |

Tablica 2.10. Svojstva i primjena Co-Cr legura [6]

2.1.3. TITAN I LEGURE TITANA

Općenito o titanu i njegovim legurama:

Titan je lagan i snažan metal, otporan na koroziju. U elementarnom stanju je crn ili siv metalni prah ili masivan metal sličan čeliku, obično zbog onečišćenja krhak, u čistom stanju rastezljiv. Pojavljuje se u mnogim mineralima, a dva najznačajnija izvora su rutil (TiO_2) i limenit (FeTiO_3), koji su široko rasprostranjeni u Zemljinoj kori. Jedna je od najznačajnijih titanovih karakteristika da ima čvrstoću kao čelik, no u isto vrijeme je dvostruko lakši od njega. Po svojim svojstvima je najbliži cirkoniju. U Tablici 2.11. navedeni su osnovni podaci o fizikalnim i mehaničkim svojstvima titana.

| | |
|--|-----------|
| Gustoća (kg/m^3) | 4500 |
| Talište ($^{\circ}\text{C}$) | 1670 |
| Modul elastičnosti (N/mm^2) | 110000 |
| Toplinska rastezljivost $10^{-6}/\text{K}$ | 9 |
| Vlačna čvrstoća* (N/mm^2) | 250...700 |
| Istezljivost* (%) | > 10 |

*ovisno o stanju obrade i udjelu nečistoća

Tablica 2.11. Fizikalna i mehanička svojstva titana [2]

Titan i njegove legure su zbog njihovog povoljnog omjera čvrstoće i gustoće u temperaturnom području od -200°C do $+550^{\circ}\text{C}$ u prednosti pred mnogim drugim inženjerskim materijalima. Također im je značajna otpornost na umor i puzanje, imaju malu toplinsku rastezljivost i veliku postojanost u različitim agresivnim sredstvima.

No proizvodni troškovi i naročito troškovi prerade još su uvijek vrlo visoki, pa se opća uporaba titana i njegovih legura znatno ograničuje.

Primjena titana u medicini

Mala gustoća i dobra mehanička i kemijska svojstva glavni su razlozi za upotrebu titana i njegovih legura u izradi implantata. Titan pokazuje otpornost na koroziju zbog formiranja tankog, čvrstog oksidnog sloja TiO_2 , međutim može i nadraživati u dodiru s istim ili različitim materijalom. Titan i njegove legure imaju široku primjenu kao koštani implantati te u zamjeni zglobnih sastava. Također nalaze primjenu kao kardiovaskularni implantati zbog svojih jedinstvenih osobina. Rana primjena bila je vezana za protezne srčane ventile, zaštitne elemente pejsmejкера, umjetna srca i cirkulativne uređaje. Legura Ti6Al4V najviše se koristi u proizvodnji implantata. Glavni legirajući elementi te legure su aluminij (5,5 do 6,5 %) te vanadij (3,5 do 4,5 %).

Česta je primjena titana i njegovih legura u stomatologiji pri izradi zubnih implantata i mostova jer su dosta niži troškovi u odnosu na legure zlata. Koristi se i za izradu umjetnih zglobova.

Postoje četiri stupnja nelegiranog komercijalno čistog titana (cpTi) za primjenu za kirurške implantate (koji se razlikuju po sadržaju nečistoća, gdje se kisik, željezo i dušik moraju pažljivo kontrolirati, pri čemu kisik ima posebno velik utjecaj na savitljivost i čvrstoću) kao i više Ti-legura od kojih se Ti6Al4V široko koristi za izradu implantata.

| Element | cpTi stupanj 1 | cpTi stupanj 2 | cpTi stupanj 3 | cpTi stupanj 4 | Ti6Al4V |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------|
| N | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| C | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,08 |
| H | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,0125 |
| Fe | 0,20 | 0,30 | 0,30 | 0,50 | 0,25 |
| O | 0,18 | 0,25 | 0,35 | 0,40 | 0,13 |
| Al | - | - | - | - | 5,50-6,50 |
| V | - | - | - | - | 3,50-4,50 |
| Ti | ostalo | ostalo | ostalo | ostalo | ostalo |

Tablica 2.12. Kemijski sastav cpTi i Ti legura [6]

Iako se Ti i njegove legure izdvajaju od svih ostalih metalnih biomaterijala za implantate, nedostatak im je relativno slaba mehanička čvrstoća, što im smanjuje primjenu za izradu spojnih dijelova za kosti.

| LEGURA | SVOJSTVA | PRIMJENA |
|----------------|---|---|
| Ti6Al4V | -znatno čvršći od običnog komercijalnog titana, ali ima njegovu krutost i toplinska svojstva (osim toplinske provodljivosti, 60% je niža) -toplinski je oblikovljiv -odlična kombinacija čvrstoće i korozijske otpornosti | -koštani implantati, zamjena zglobnih sastava (dijelova) -kardiovaskularni implantati -srčani ventili, zaštitni elementi pejsmejкера, cirkulativni uređaji -zubni implantati i mostovi |

Tablica 2.13. Svojstva i primjena Ti6Al4V legure [6]

Slika 2.1.a) Metalne ploče i vijci za fiksaciju slomljenih kostiju tijekom njihova zacjeljenja [1]



Slika 2.1.b) Rendgenske slike [1]

2.2. POLIMERI I HIDROGELOVI

2.2.1. POLIMERI

Općenito o polimerima:

Polimeri su tvari nastale međusobnim povezivanjem (kovalentnom vezom) malih molekulskih jedinica (monomera), koje se obično ponavljaju po nekom pravilu u velike molekule (makromolekule).

Podjela polimera:

1) S obzirom na postanak:

| | |
|--------------------------------------|---|
| Prirodni (biopolimeri) | - <i>celuloza</i> -polisaharid (stjenke biljnih stanica) - <i>škrob</i> -polisaharid (gomolji, zrnje) - <i>keratin</i> -polipeptid (dlaka, koža, nokti, rogovi, svila, vuna) - <i>kaučuk</i> -poliizopren (mliječni sok nekih biljaka) |
| Polusintetski polimeri | -kemijski modificirani biopolimeri: -iz celuloze: celulozoid, acetatna traka -iz bjelanjčevina (kazein iz mlijeka): umjetna rogovina |
| Organski sintetski polimeri | -dobiveni su kemijskom sintezom (polimerizacijom) iz jednostavnih organskih spojeva, npr. PE, PP, PVC, PS... |
| Anorganski sintetski polimeri | -dobiveni su kemijskom sintezom iz jednostavnih organskih i anorganskih spojeva, a lanac makromolekule nije iz ugljikovih atoma, npr. silikoni (ulja za podmazivanje) |

Tablica 2.14. Podjela polimera s obzirom na postanak [5]

2) S obzirom na vrstu monomera u makromolekuli:

| | |
|---------------------|--|
| Homopolimeri | -makromolekula im je sastavljena iz samo jedne vrste monomera |
| Kopolimeri | -makromolekula polimera nastala je povezivanjem dvaju ili više različitih vrsta monomera -prema načinu slaganja pojedinih monomera u makromolekulama razlikuju se: -stohastički kopolimer -naizmjenični kopolimer -blok kopolimer -cijepljeni kopolimer |

Tablica 2.15. Podjela polimera s obzirom na vrstu monomera u makromolekuli [5]

3) S obzirom na građu makromolekula:

| | |
|---------------------------------|--|
| Linearni polimeri | -monomeri lanaca linearnih polimera uzajamno su povezani kovalentnim vezama dok su lanci uzajamno povezani Van der Waalsovima vezama |
| Granati polimeri | -pri formiranju granatih polimera dolazi mjestimično do bočnog odvajanja grana kovalentno povezanih s osnovnim lancem |
| Poprečno vezani polimeri | -kod poprečno vezanih polimera susjedni osnovni lanci polimera mjestimično su povezani kovalentnim vezama |
| Mrežasti polimeri | -prostorno umrežene strukture polimera formiraju monomeri s tri vezna C atoma |

Tablica 2.16. Podjela polimera s obzirom na građu makromolekula [5]

4) S obzirom na ponašanje pri povišenim temperaturama:

| | |
|---------------------------------|---|
| Plastomeri (Termoplasti) | <ul style="list-style-type: none"> -građeni su iz linearnih ili granatih makromolekula koje su međusobno povezane slabim Van der Waalsovima vezama -pri porastu temperature omekšavaju te se potom pri opadanju temperature skrućuju -lako se prerađuju u najrazličitije proizvode -otapaju se u različitim otapalima, a otopine su im vrlo viskozne -zbog slabih međumolekulskih veza mogu se ponovno koristiti |
| Duromeri (Duroplasti) | <ul style="list-style-type: none"> -mrežasti polimeri, makromolekule su im povezane kovalentnom vezom -postupcima polimerizacije ne polimeriziraju do kraja nego samo do 1. stupnja, pa su kao sirovina slični plastomerima -pri zagrijavanju vrlo malo omekšaju ili uopće ne omekšaju, nego se umrežavaju -netopljivi su, ne taljivi su i ne mogu bubriti - ne mogu se plastično oblikovati i ponovno preoblikovati jer zagrijavanjem dolazi do kidanja kovalentnih veza između makromolekula |
| Elastomeri | <ul style="list-style-type: none"> -rahlo umrežene makromolekule - na sobnoj temp. elastomer može biti produljen višestruko, a nakon prestanka naprezanja odmah se vrati u svoju početnu duljinu -netopljivi su, netaljivi i bubre -mogu se oblikovati prije dovršenja umrežavanja, u omekšanom stanju |
| Elastoplastomeri | <ul style="list-style-type: none"> -ova skupina polimera ima elastična svojstva kao elastomeri, a pri rastu / opadanju temperature se omekšavaju / skrućuju kao plastomeri |

Tablica 2.17. Podjela polimera prema njihovom ponašanju pri povišenim temperaturama [5]

Prednosti i nedostaci polimernih materijala prikazani su u Tablici:

| Prednost | Nedostatak |
|--|---|
| Mala gustoća | Ovisnost svojstava o raznim utjecajnim faktorima |
| Dobra kemijska postojanost | Veća toplinska rastezljivost |
| Dobra otpornost na trošenje | Nizak modul elastičnosti |
| Mali faktor trenja | Mala površinska tvrdoća |
| Dobro prigušivanje vibracija | Podložnost starenju |
| Dobra toplinska i elektroizolacijska svojstva | Mala toplinska vodljivost |
| Preradljivost deformiranjem pri relativno malo povišenim temperaturama | Utjecaj prerade na svojstva |
| Ekonomična serijska izrada dijelova | Neekonomična proizvodnja malih količina proizvoda |

Tablica 2.18. Prednosti i nedostaci polimernih materijala [5]

Primjena polimera u medicini:

Polimeri se uvelike koriste u medicini i farmaceutskoj industriji, primjeri nekih navedeni su u slijedećoj tablici:

| | |
|-----------------------------------|---|
| Najlon | -kirurški šavovi, gastrointestinalni segmenti, trahealne cijevi |
| Silikonska guma | -spojevi između prstiju, umjetna koža, implantati grudi, intraokularne leće, kateteri |
| Poliester | -resorptivni konci (razgrađuju se), fiksacija prijeloma, obloge za kožne rane, uređaji za primjenu lijeka |
| Polietilen (PE) | -implantati koljena i kuka, umjetne tetive i ligamenti, sintetički vaskularni transplantati, proteze, implantati lica |
| Polimetilmetakrilat (PMMA) | -koštani cement, intraokularne leće |
| Polivinilklorid (PVC) | -cijevi, proteze lica, materijal za vrećice krvi |

Tablica 2.19. Primjena nekih polimera u medicini [2] , [6]

Polimeri i polimerni materijali se u farmaciji najčešće koriste kao pomoćne tvari koje utječu na oblikovanje i djelovanje farmaceutskih pripravaka te kao ambalaža za pakiranje pripravaka. Izbor polimera definiran je njegovim specifičnim svojstvima. Polimerni materijal koji se s lijekom unosi u organizam mora biti biorazgradiv tako da se s vremenom razgrađuje u organizmu na produkte koji nisu toksični i izlučuju se prirodnim putem iz organizma te biokompatibilan pri čemu u dodiru s organizmom ne izaziva neželjene i toksične nuspojave.

Polimeri koji se koriste pri izradi lijekova mogu se podijeliti na topljive i netopljive u vodi. Polimeri topivi u vodi koriste se za kontrolu viskoznosti, za stabilizaciju farmaceutskih suspenzija, za stvaranje filmskih ovojnica te matričnih sustava topivih u vodi. Netopljivi ili djelomično topljivi polimeri često se koriste kao polimerne membrane. Polimeri koji se koriste u farmaciji mogu biti prirodnoga ili sintetskog podrijetla te se mogu razlikovati s obzirom na kemijsku strukturu, veličinu ili oblik. Neki od tih polimera su navedeni u sljedećoj tablici.

| PRIRODNI POLIMERI | SINTETSKI POLIMERI |
|--------------------------|-----------------------------|
| Celuloza | Polietilen-oksidi (PEO) |
| Karboksimetil-celuloza | Polivinil-alkohol (PVA) |
| Karageni | Polivinil—pirolidon (PVP) |
| Pektini | Polietilen-glikol (PEG) |
| Alginati | Poliakrilna kiselina (PAA) |
| Kitozan | Polimetil-metakrilat (PMMA) |
| Guar guma | / |
| Agar | / |

Tablica 2.20. Neki od polimera koji se upotrebljavaju pri izradi lijekova [6]

U sljedećim tablicama biti će prikazana specifična svojstva nekih polimera često korištenih u medicini i farmaceutskoj industriji:

| SVOJSTVO | | PE-LD | PE-HD | PP |
|--|-------------------|------------------|------------------|------------------|
| Modul elastičnosti | N/mm ² | 150 do 300 | 600 do 1000 | 1100 do 1300 |
| Granica razvlačenja | N/mm ² | 8 do 10 | 20 do 30 | 32 do 37 |
| Istezanje na granici razvlačenja | % | 20 | 12 do 15 | 12 do 16 |
| Istezljivost (prekidno istezanje) | % | >400 | >500 | 600 |
| Temperatura omekšavanja po VICATu | °C | <40 | 60 do 65 | 90 do 100 |
| Područje taljenja kristala | °C | 105 do 110 | 130 do 135 | 155 do 165 |
| Specifični otpor prolaza | Ωcm | 10 ¹⁶ | 10 ¹⁶ | 10 ¹⁶ |
| Dielektričnost | F/m | 2,3 | 2,3 | 2,3 |
| Dielektrični faktor gubitaka | / | 0,0002 do 0,0007 | 0,0002 do 0,0007 | 0,0002 do 0,0007 |
| Čvrstoća proboja | KV/mm | 110 | 150 | 100 |

Napomena: oznaka LD- niske gustoće, oznaka HD – visoke gustoće

Tablica 2.21. Svojstva nekih polietilena i polipropilena [2]

Svojstva nekih polimera i njihova primjena u medicini:

| POLIMERI | SVOJSTVA | PRIMJENA U MEDICINI |
|--------------------------------------|---|---|
| Kolagen | -biorazgradivost visoka mehanička čvrstoća -slaba rastezljivost (samo 4%) -izuzetna sposobnost hidratacije površinskih slojeva epiderma | -upotrebljavaju se (vrijedi i za kolagen i za hitosan) kao podloge za stvaranje bioinženjerskih struktura tkiva za organe kao što su: kosti, hrskavica, koža, tanko crijevo, srčani mišić... -primjena hitozana: -za opekotine, rane, ozljede kože općenito --adsorbira i uklanja štetne tvari iz organizma -smanjuje nivo lipida u krvi, čistač krvnih žila, regulira krvni tlak -smanjuje šećer u mokraći kod bolesnika s pretilošću -poboljšava funkciju jetre, stabilizira pH krvi... |
| Hitozan | --- | |
| Celofan | --- | -upotrebljava se kao membrana koja filtrira i odvaja dijalizu tekućine iz krvi, jedan od najvažnijih materijala pri tretmanu poteškoća u radu bubrega -danas se sve više zamjenjuje polipropilenom (PP) |
| Polietilen (PE) | -visoka čvrstoća i modul elastičnosti, visoka otpornost na umor -dugoročna dimenzijska stabilnost -kemijski je inertan i nema otapala <u>pri sobnoj temperaturi</u> -njegovu oksidaciju uzrokuje dušična kiselina, visoke temperature i gama zračenje, otpornost na oksidaciju raste s većom gustoćom uslijed dužih nerazgranatih lanaca | -implantati koljena i kuka, umjetne tetive i ligamenti, sintetički vaskularni transplantati, proteze, implantati lica |
| Poli(metil-metakrilat) (PMMA) | -visoka čvrstoća i modul elastičnosti, visoka otpornost na umor -dugoročna dimenzijska stabilnost, dobra propusnost svjetla | -koštani cement-→npr. koristi se kod ugradnje umjetnog kuka, intraokularne leće |
| Poli(vinil-klorid) (PVC) | -velika postojanost prema kiselinama, lužinama, i | -cijevi, proteze lica, materijal za vrećice krvi |

| | | |
|---|--|---|
| | organskim otapalima (osim ketona i aromata), dobra otpornost na trošenje, postojanost oblika, toplinska postojanost do 80 °C, ne upija vodu, nepropustan za plinove, ali ne i za paru, veća molekularna masa → bolja mehan. svojstva | |
| Poli(tetrafluoretilen) (PTFE) | -kombinacija visoke čvrstoće i kemijske postojanosti, dobra žilavost, izvrsna postojanost prema UV zračenju i atmosferskim utjecajima, izvrsna dielektrična svojstva | -izrada umjetnih krvnih žila i srčanih zalistaka (krpanje oštećenih područja arterija, potpuna zamjena čitavih segmenata većih arterija poput aorte, šivaće kopče) |
| Poliuretan (PU) | -visoka čvrstoća i velika postojanost na uvjete okruženja (osjetljiv na jake kiseline i baze, vrelu vodu i pregrijanu paru; otporan na slabe kiseline i baze, kisik i ozon, slabe alkale, ulja, petrolej i slične materijale) | -uređaji za pomoć pri radu klijetki srca |
| Poli(dimetil-siloksan) (PDMS) | -kao vulkanizirana guma ne može se rastaliti ili razgraditi, nije jako osjetljiv na bakterijske infekcije -izvrsna fleksibilnost i stabilnost | -konstrukcija elektrostimulatora srca (pacemakera) -isporuka cjepiva u obliku biorazgradivih kuglica -u cijevima katetera i drenaže, u izolacijama vodiča elektrostimulatora srca -upotreba u raznim protezama (implantati brade i nosa, zglobovi prstiju, krvne žile, srčani zalisci, implantati dojki, ušima...) -upotrebljava se u membranama uređaja za kisik |
| Kopolimeri hidroksietilmetakrilata i metakrilata | -dobra optička svojstva i visoka permeabilnost na plinove i pare | -leće (monofokalne i multifokalne intraokularne leće), segmenti rožnice |

Tablica 2.22. Svojstva nekih polimera i njihova primjena u medicini [2],[6]



Slika 2.2 Umjetni zglob koljena [1]

Primjena nekih polimera na određene dijelove ljudskog tijela:

| PODRUČJE PRIMJENE | POLIMERI |
|---------------------------|--|
| Srce i dijelovi srca: | -poliester, silikon, PVC |
| Pacemaker: | -polietilen, acetal |
| Pluća, jetra i bubrezi: | -poliester, polialdehid, PVC |
| Krvne žile: | -PVC, poliester |
| Jednjak | -polietilen, polipropilen, PVC |
| Probavni trakt: | -akrilik, silikon, najlon |
| Gastrovaskularni segmenti | -silikon, PVC, najlon |
| Zglobovi prstiju | -silikon, UHMWPE* |
| Ostali zglobovi: | - akrilik, najlon, silikon, PUR, PP, UHMWPE* |
| Koljeno: | -polietilen |
| Uši: | -polietilen, silikon, polivinil-klorid (PVC) |
| Zubne proteze: | -UHMWPE*, epoksidi |
| Proteze lica: | -akrilik, PVC, poliuretan (PUR) |

*Ultra-high-molecular-weight polyethylene, polietilen sa ultra visokom molekularnom masom

Tablica 2.23. Primjena nekih polimera na određene dijelove ljudskog tijela [8]

2.2.2. HIDROGELOVI

Općenito o hidrogelovima:

Hidrogel čine mreža hidrofilnih polimernih lanaca i kapljeviti konstituent, voda. Mrežasta struktura hidrofilnih polimernih lanaca upija vodu i zadržava je unutar pora. Količina vode koju hidrogel može pohraniti mijenja se ovisno o njegovom kemijskom sastavu, od 30 % pa do više od 99% ukupne mase.

Kemijski sastav i svojstva hidrogela:

Danas najčešće korišten hidrogel je po kemijskom sastavu natrijev poliakrilat, koji je nastao polimerizacijom akrilne kiseline pomiješane s natrijevim hidrooksidom. Strukturna formula mu glasi $(C_3H_3Na)_n$. Međutim hidrogelovi mogu biti po kemijskom sastavu: poli(vinil-alkohol) kopolimer (PVAL), poli(akril-amid) kopolimer, unakrsno povezan poli(etilen-oksidi) ili unakrsno povezana karboksi-metil celuloza.

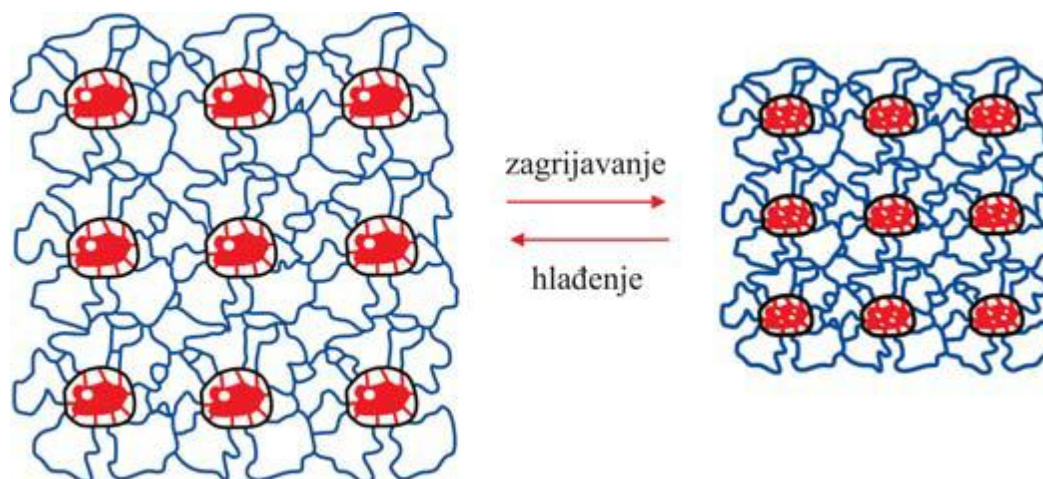
Glavna svojstva svakog hidrogela je njegova sposobnost upijanja velikih količina vode te visoka elastičnost.

Primjena u biomedicini:

Hidrogel može biti prirodnoga i sintetičkoga podrijetla, a posjeduje dobra elastična svojstva, gotovo identična tkivu živog organizma. Budući da može pohraniti veliku količinu vode, kompatibilan je s ljudskim tkivom, kao što su oči, koža, unutarnji organi i sl. Osim tog važnog svojstva treba spomenuti i njegovu inertnost (ne reagira u dodiru s ljudskim tkivom). Upravo ta dva važna svojstva, kompatibilnost i inertnost čini hidrogelove zanimljivim za uporabu u medicini.

U pore mrežastih hidrogelova, osim vode, mogu se ugraditi razne molekule, ali i tkiva. Tako je moguće unutar pora ugraditi žive stanice kože, vitamine i lijekove. Hidrogelovi koji imaju tu mogućnost iznimno su pogodni za prekrivanje rana na koži u svrhu njihova što bržeg zacjeljenja te kako bi ožiljak nakon ozljede bio manje uočljiv. Primjer proizvoda napravljenog u te svrhe je flaster za žuljeve naziva Compeed ili Herpes Simplex. Takvi proizvodi upijaju izlučevine s mjesta ozljede te svojom elastičnošću onemogućavaju daljnje širenje ozljede. Hidrogelovi se sve više upotrebljavaju i u plastičnoj kirurgiji. Upotrebljavaju se kao implantati za povećanje grudi, stražnjice, usana.

Važno je spomenuti još jednu primjenu hidrogela, a to je njegova uloga u otpuštanju lijeka, odnosno njegova oslobađanja u čovjekovu tijelu. Naime, prilikom vrlo malog povišenja temperature smanjuje se volumen hidrogela. Ako se u bolesnikovo tijelo ugradi takav hidrogel koji će reagirati na njegovu tjelesnu temperaturu, tada će on svojim smanjenjem volumena otpuštati lijek koji je prethodno ugrađen u njegove pore.



Slika 2.3 Temperaturno osjetljiv hidrogel [7]

Postoje i hidrogelovi koji su osjetljivi na koncentracije određenih molekula (npr. glukoze) te na promijenu pH vrijednosti. Zbog svog svojstva difuznosti plinova, hidrogelovi imaju primjenu i u proizvodnji kontaktnih leća. Svojstvo difuznosti kod hidrogela omogućava prijenos kisika do stjenke oka te je na taj način smanjen rizik od infekcije, odnosno nastanka bakterija u prostoru između očne stjenke i leće.

Hidrogelovi se koriste i kao podmazivači. Podmazivanje je u pravilu rađeno prevlakama hidrogelova. Oni su potrebni da ne bi došlo do ozljede u rukovanju s živim mekim tkivom. Radi toga se premazuju lateks rukavice i kateteri sa slojevima hidrogela kako bi se smanjile ozljede. Također se primjenjuju kako bi se smanjilo trenje na unutarnjim stjenkama cjevčica za drenažu raznih tjelesnih tekućina.

Najčešće područje njihove primjene je da služe kao higijenski ulošci za žene te kao pelene za djecu i starije osobe zbog svoje sposobnosti upijanja i zadržavanja kapljevine.

2.3 KERAMIKA

Općenito o keramici:

Keramički materijali su materijali sastavljeni od metalnih i nemetalnih elemenata spojenih ionskim i/ili kovalentnim vezama. Kemijski sastav keramičkih materijala znatno se mijenja od jednostavnih spojeva do smjesa mnogih kompleksnih faza. Svojstva keramičkih materijala zbog različitosti u načinu vezivanja također značajno variraju. Općenito, keramički materijali su tvrdi i krhki s malom žilavošću i duktilnošću. Obično su dobri električni i toplinski izolatori zbog odsutnosti vodljivih elektrona. Keramika ima visoko talište i veliku kemijsku postojanost u odnosu na mnoge agresivne sredine. Međutim, važno je napomenuti da se samo manji dio keramičkih materijala može primijeniti za konstrukcijske dijelove. Ti su materijali poznati kao tehnička ili konstrukcijska keramika.

Glavne vrste konstrukcijske keramike:

Na temelju sastava razlikuju se dvije glavne skupine konstrukcijske keramike:

1. **oksidna**- glavni predstavnici: Al_2O_3 , ZrO_2 i Al_2TiO_5
2. **neoksidna**-glavni predstavnici: SiC , Si_3N_4 , B_4C , AlN , kubični BN

U usporedbi s metalnim materijalima konstrukcijska keramika posjeduje sljedeća svojstva:

- višu tvrdoću, osobito pri povišenim temperaturama
- višu tlačnu i savojnu čvrstoću, osobito pri povišenim temperaturama
- veću otpornost na puzanje
- viši modul elastičnosti-krutost
- manju toplinsku i električnu vodljivost-bolja izolacijska svojstva
- veliku otpornost na trošenje
- manju gustoću
- malu toplinsku rastezljivost
- kemijsku inertnost
- dugoročnija sigurnija opskrba sirovinama za njezinu proizvodnju

Nedostaci konstrukcijske keramike su:

- mala žilavost, velika krhkost
- mala otpornost na toplinski umor
- niska vlačna čvrstoća
- veliko rasipanje vrijednosti za mehanička svojstva
- visoki troškovi sirovina i postupaka oblikovanja
- veza metal-keramika i keramika-keramika još nije zadovoljavajuće riješena

Biokeramika

Keramički materijali predstavljaju jedne od najvažnijih biomaterijala koji se danas koriste zbog brojnih prednosti koje pokazuju u odnosu na druge biomaterijale. Biokeramika ima značajnu primjenu u stomatologiji i ortopediji. U stomatologiji se najčešće upotrebljava za izradu krunica i proteza, a u ortopediji za zamjenu zglobova i koštanih segmenata kao i za izradu privremenih aparata za reparaciju košanog tkiva. Važno je i spomenuti da se biokeramički materijali koriste i za izradu prevlaka implantata proizvedenih od drugih materijala sa ciljem osiguravanja biokompatibilnosti međuspoja sa okolnim tkivom. Poznata je kirurška upotreba keramike kao i biotehnička (biočipovi) te kardiovaskularna i dermatološka upotreba. Neki od poznatijih primjera upotrebe keramike su keramički zglob i kuk te različite vrste keramičkih implantat glavica.

Glavni predstavnici keramičkih biomaterijala su biokeramički materijali na bazi kalcijeva fosfata te Al_2O_3 keramika i keramika na bazi cirkonijeva oksida.

Kalcijev fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) je specifičan po tome što je sposoban tvoriti čvrste veze sa kostima te je izrazito biokompatibilan. Najčešća uporaba mu je popunjavanje koštanih defekata svojom poroznom i zrnatom strukturom.

Glavno obilježje aluminijske oksida Al_2O_3 je njegova korozijska postojanost i inertnost. Iako ima dobre mehaničke karakteristike, zamjetno je lomljiv naspram kostiju. Njegova najveća primjena je u izradi zglobnih proteza zbog svoje izrazite otpornosti na trošenje.

Neka od fizikalnih svojstava Al_2O_3 keramike prikazana su u Tablici (knjiga Biomaterijali, skupina autora):

| FIZIKALNA SVOJSTVA | Komercijalno dostupni keramički implantati na bazi Al_2O_3 | ISO Standard 6474 | Predloženi novi ISO Standard |
|--|--|-------------------|------------------------------|
| Sadržaj aluminija (maseni udio u %) | >99,7 | $\geq 99,51$ | / |
| $\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O}$ (%) | <0,02 | <0,1 | / |
| Gustoća (g/cm^3) | 3,98 | / | $\geq 3,94$ |
| Prosječna veličina zrna (μm) | 3,6 | <7 | <4,5 |
| Tvrdoća (Vickers, HV) | 2400 | >2000 | / |
| Zamor materijala na savijanje (MPa) (nakon testiranja u Ringerovom rastvoru) | 595 | >400 | >450 |

Tablica 2.24. Neka od fizikalnih svojstava Al_2O_3 keramike [6]

U sljedećoj tablici prikazani su neki predstavnici biokeramike te njihova najvažnija svojstva i primjena:

| VRSTA BIOKERAMIKE | SVOJSTVA | PRIMJENA |
|---|---|---|
| Kalcijev fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) | -izrazita biokompatibilnost, tvori čvrste veze s kostima | -popunjavanje koštanih defekata -umjetne kosti |
| Aluminijev oksid (Al_2O_3) (Aluminij-oksidsna keramika) | -korozijska postojanost i inertnost, dobre mehaničke karakteristike, lomljiv -temperaturna stabilnost -visoka čvrstoća i tvrdoća -velika otpornost na trošenje | -izrada zglobnih proteza , zglob umjetnog kuka, ramena proteza |
| Cirkonijeva keramika (ZrO_2) (Cirkonijev dioksid) | -bolja mehanička svojstva od aluminij-oksidsne keramike -dobra kemijska i estetska svojstva te dimenzijska stabilnost -visoka lomna žilavost -velika otpornost na trošenje i koroziju -visoka savojna i vlačna čvrstoća -mala toplinska vodljivost -vrlo dobra tribološka svojstva -biokompatibilnost slična | -gradivni materijal u protetici -izrada mostova i krunica u stomatologiji (estetski gradivni materijal) - kao prvi sloj oko voštanog objekta smanjuje reakciju titana s uložnim materijalom, istodobno znatno smanjuje debljinu površinskog reakcijskog sloja na titanskom odljevu -izradba glavica kod potpune izmjene kuka |

| | titanu i njegovim legurama | |
|--|---|--|
| Oxinium (trgovački naziv, legura cirkonijeva dioksida) | -velika otpornost na abraziju u usporedbi sa tradicionalnim metalnim materijalima za implantate poput Kobalt-krom legura -niži koeficijent trenja u odnosu na UHMWPE -jednostavnija izrada implantata i njihova bolja žilavost -objedinjuje svojstva keramike (otpornost na abrazivno trošenje i nisko trenje) i metala (žilavost i obradivost) | -upotrebljava se za izradu umjetnih zglobova u ortopedskoj kirurgiji |

Tablica 2.25. Predstavnici biokeramike, njihova svojstva i primjena [4],[6]

2.4. KOMPOZITNI MATERIJALI

Općenito o kompozitima:

Kompozitni materijali proizvedeni su umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe.

Kompoziti mogu biti: metalno-metalni, metalno-keramički, metalno-polimerni, keramičko-keramički, polimerno-polimerni, keramičko-keramički, polimerno-polimerni, polimerno-metalni. Njihova osnovna podjela je na metalne, keramičke i polimerne kompozite. Ti materijali predstavljaju osnovu kompozita, odnosno matricu. Matrici se dodaju različiti dodaci.

Ukupno ponašanje kompozita ovisi o:

1. svojstvima matrice i ojačala
2. veličini i rasporedu konstituenata
3. volumnom udjelu konstitueanata
4. obliku konstituenata
5. prirodi i jakosti veze među kosntituentima

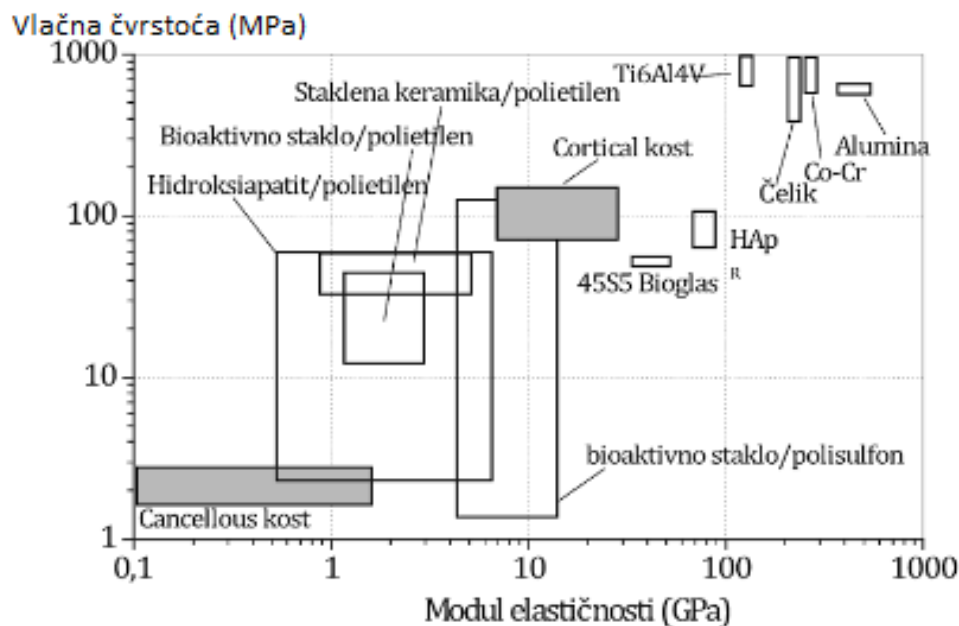
Osnovni tipovi kompozita su:

1. Kompoziti s česticama
 - 1.1 Kompoziti s disperzijom
 - 1.2 Kompoziti s velikim česticama
2. Vlaknima ojačani kompoziti
3. Slojeviti kompoziti

Kompozitni biomaterijali

Postoji velik broj vrsta i grupa kompozitnih materijala sa različitim namjenama. Oni trenutno predstavljaju najinteresantnije biomaterijale sa kojima bi se mogla izvršiti reparacija koštanog tkiva. Posebno pri tome treba naglasiti kompozitni materijal na bazi hidroksiapatita (HAp) jer on predstavlja glavni sastojak prirodnog koštanog tkiva. Na Slici 2.4 prikazana je zavisnost modula elastičnosti od vlačne čvrstoće različitih grupa kompozitnih biomaterijala. Uočava se da su kompoziti na bazi hidroksiapatita svojim svojstvima bliski prirodnom koštanom tkivu.

Na površini biomaterijala prevladava (HAp), čija se koncentracija prema unutrašnjosti smanjuje u korist titana.



Slika 2.4 Modul elastičnosti i vlačna čvrstoća različitih materijala [6]

Glavni predstavnici kompozitnih biomaterijala

1. Keramika / keramika kompoziti
2. Keramika / bioaktivno staklo kompoziti
3. Keramika / polimer kompoziti
4. Hap / PLLA biokompoziti

1. Keramika / keramika kompoziti

Ovi kompozitni biomaterijali većinom se odnose na: TCP / HAp (TCP-trikalcijev fosfat, HAp-hidroksiapatit), HAp / Al_2O_3 , HAp / SiO_2 i slične kompozite. Dodavanjem različitih vrsta keramike u HAp povećavaju se njegove mehaničke karakteristike, ali se ujedno smanjuje biokompatibilnost kompozita i povećavaju teškoće procesiranja. Zbog toga ova vrsta kompozita nije našla širu kliničku upotrebu.

2. Keramika / bioaktivno staklo kompoziti

Zauzimaju visoko mjesto kao biomaterijali koji se trenutno najviše koriste za zamjenu malih kostiju srednjeg uha. Keramička komponenta je najvećim dijelom kod ove vrste kompozita CP, BCP ili HAp. Ova vrsta kompozita pokazuje visoku biokompatibilnost i bioaktivnost, što rezultira čvrstom vezom implantat- tkivo.

3. Keramika / polimer kompoziti

Ovi kompoziti su po mehaničkim svojstvima najbliži osobinama prirodnog koštanog tkiva. Najveći problem kod ove vrste predstavlja toksičnost polimera i njegova nepostojanost tijekom starenja. Najveći broj polimera, koji se koristio za sintezu keramika / polimer kompozita, u organizmu je oslobađao produkte koji su negativno utjecali na metabolizam okolnog tkiva ili je pak prilikom primjene mijenjao strukturu, a time i osobine. Ovi problemi su se do neke mjere uspjeli ukloniti, pa se stoga kompoziti ovog tipa i dalje koriste.

4. Hap / PLLA biokompoziti

Primjenjuju se za reparaciju koštanog tkiva jer biodegradabilni polimeri na bazi PLLA (poli – l-laktida) na svojoj površini omogućavaju dobru adheziju osteoblasta kao i adheziju proteina i faktora rasta odgovornih upravo za reparaciju koštanog tkiva.

Sljedeća tablica prikazuje primjenu nekih kompozita:

| KOMPOZIT | PRIMJENA |
|------------------------------|--|
| Keramika / polimer | -za zamjenu i popravak kostiju i dijelova sustava organa za kretanje |
| Polimerni kompoziti | -obnavljanje krvožilnog sustava (razvoj srčanih zalistaka i zamjena za dijelove krvnih žila) -primjena u živčanom sustavu |
| Keramika / bioaktivno staklo | - zamjena malih kostiju srednjeg uha |
| Stomatološki * | -dentalna medicina |

Tablica 2.26. Primjena nekih biokompozita [6]

Stomatološki kompoziti *

Najčešći u primjeni su kompoziti kod kojih je organska matrica:

1. Bowenova smola (Bis-GMA), punog naziva aromatski bisfenol-A-glicidil-dimetakrilat
-viskoznost Bis-GMA matrice je previsoka pa se razrjeđuje s manje viskoznim komonomerima kao što je trieten-glikol-dimetakrilat (TEGDMA)
2. uretan- dimetakrilat (UDMA)
-niže je viskoznosti i postiže bolji stupanj polimeriziranosti

Kao anorgansko punilo kod ovih kompozita rabe se različite anorganske čestice: kvarc , koloidni silicijev dioksid, borosilikatno staklo... Čestice anorganskog punila različite su veličine i oblika te se dodaju organskoj matrici do njezina zasićenja. Veličina čestica utječe na svojstva kompozita.

Kao međugranično vezivno sredstvo kod stomatoloških kompozita najčešće se upotrebljava silan.

3. VODILJE ZA SINTEZU BIOMATERIJALA

Na sljedećim stranicama tablično će se prikazati i grupirati biomaterijali po svojoj primjeni, svojstvima, grupi (skupini) kojoj pripadaju, a sve u svrhu lakšeg i točnijeg odabira željenog materijala za primjenu u medicinskim konstrukcijama.

Svi biomaterijali tablično spomenuti u ovome radu:

(poredani po osnovnim grupama)

| GRUPA BIOMATERIJALA | PRIMJENA U MEDICINI |
|-----------------------------------|---|
| 1. METALI: | |
| 1.1 Čelici | |
| X15Cr13 (Č4171) | - izrada kirurških instrumenata |
| X15CrMo13 | |
| X12CrNi18-8 (Č4571) | -u ortopediji |
| X10CrNiMoTi18-10 (Č4571) | -izrada uređaja za medicinu |
| X10CrNiMoNb18-10 (Č4571) | |
| 1.2 Kobalt-krom legure | |
| CoCrMo | -umjetni zglobovi, -dentalna medicina→ ortodontske žice -filtri krvnih ugrušaka |
| CoNiCrMo | -izrada koronarnog stenta - izrada umjetnih zglobova (jako opterećenih)→umjetni kuk -kabeli za ortopedsku upotrebu -žice (kabeli) defibrilatora -filtri krvnih ugrušaka |
| 1.3 Titan i njegove legure | |
| Ti6Al4V | -koštani implantati, zamjena zglobnih sastava (dijelova) -kardiovaskularni implantati -srčani ventili, zaštitni elementi pejsmejke, cirkulativni uređaji -zubni implantati i mostovi |
| 2. Polimeri i hidrogelovi | |
| 2.1 Polimeri | |
| Kolagen | -upotrebljavaju se kao podloge za stvaranje bioinženjerskih struktura tkiva za organe kao što su: kosti, hrskavica, koža, tanko crijevo, srčani mišić... |
| Hitosan | |
| Celofan | -upotrebljava se kao membrana koja filtrira i odvaja dijalizu tekućine iz krvi, jedan od |

| | |
|--|---|
| | najvažnijih materijala pri tretmanu poteškoća u radu bubrega -danas se sve više zamjenjuje polipropilenom (PP) |
| Najlon | -kirurški šavovi, gastrointestinalni segmenti, trahealne cijevi |
| Silikonska guma | -spojevi između prstiju, umjetna koža, implantati grudi, intraokularne leće, kateteri |
| Poliester | -resorptivni konci (razgrađuju se), fiksacija prijeloma, obloge za kožne rane, uređaji za primjenu lijeka |
| Polietilen (PE) | -implantati koljena i kuka, umjetne tetive i ligamenti, sintetički vaskularni transplantati, proteze, implantati lica |
| Poli(metil-metakrilat) (PMMA) | -koštani cement-→ npr. koristi se kod ugradnje umjetnog kuka, intraokularne leće -u farmaceutskoj industriji (izrada lijekova) |
| Poli(vinil-klorid) (PVC) | -cijevi, proteze lica, materijal za vrećice krvi |
| Poli(tetrafluoretilen) (PTFE) | -izrada umjetnih krvnih žila i srčanih zalistaka (krpanje oštećenih područja arterija, potpuna zamjena čitavih) |
| Poliuretani (PU) | -uređaji za pomoć pri radu klijetki srca |
| Poli(dimetil-siloksan) (PDMS) | -konstrukcija elektrostimulatora srca (pacemakera) -isporuka cjepiva u obliku biorazgradivih kuglica -korištenje kod elektrostimulatora -u cijevima katetera i drenaže, u izolacijama vodiča elektrostimulatora srca -upotreba u raznim protezama (implantati brade i nosa, zglobovi prstiju, krvne žile, srčani zalisci, implantati dojki, ušima...) -upotrebljava se u membranama uređaja za kisik |
| Kopolimeri hidroksietilmetakrilata i metakrilata | -leće (monofokalne i multifokalne intraokularne leće), segmenti rožnice |
| Celuloza | -primjena u farmaciji, najčešće za izradu lijekova i ambalaža za njihov transport |
| Karboksimetil-celuloza | |
| Karageni | |
| Pektini | |
| Alginati | |
| Kitozan | |
| Guar guma | |
| Agar | |

| | |
|--|---|
| Polietilen-oksid (PEO) | -primjena u farmaciji, najčešće za izradu lijekova i ambalaža za njihov transport |
| Polivinil-alkohol (PVA) | |
| Polivinil-pirolidon (PVP) | |
| Polietilen-glikol (PEG) | |
| Poliakrilna kiselina (PAA) | |
| 2.2 Hidrogelovi | -za prekrivanje rana na koži u svrhu njihova što bržeg zacjeljenja te kako bi ožiljak nakon ozljede bio manje uočljiv - u plastičnoj kirurgiji (kao implantati za povećanje grudi, stražnjice, usana...) - uloga otpuštanja lijeka , odnosno njegova oslobađanja u čovjekovu tijelu - primjena u proizvodnji kontaktnih leća - kao podmazivači lateks rukavica i katetera - za smanjenje trenja na unutarnjim stjenkama cjevčica za drenažu raznih tjelesnih tekućina - higijenski ulošci za žene te kao pelene za djecu i starije osobe |
| 3.Keramika | |
| Kalcijev fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) | -popunjavanje koštanih defekata |
| Aluminijev oksid (Al_2O_3) | -izrada zglobnih proteza |
| 4.Kompoziti | |
| Keramika / polimer | -za zamjenu i popravak kostiju i dijelova sustava organa za kretanje |
| Polimerni kompoziti | -obnavljanje krvožilnog sustava (razvoj srčanih zalistaka i zamjena za dijelove krvnih žila) -primjena u živčanom sustavu |
| Stomatološki * | -dentalna medicina |
| 5.Prirodni materijali | |
| Kolagen i gelatin | -plastična kirurgija, zavoji za rane, tkivni inženjering |
| Celuloza | -dostava lijekova |
| Hitin | -obloge za rane, dostava lijekova |
| Keramika ili demineralizirana keramika | -umjetne kosti |
| Alginat | -dostava lijekova, inkapsulacija stanica |
| Hijaluronska kiselina | -postoperativna prevencija adhezije, očna i ortopedska maziva, dostava lijekova |
| Oxinium | -upotrebljava se za izradu umjetnih zglobova u ortopedskoj kirurgiji |

Tablica 3.1. Neki od biomaterijala i njihova medicinska primjena [2],[4],[6]

Svojstva nekih biomaterijala:

| BIOMATERIJALI | SVOJSTVA |
|--------------------------|---|
| X15Cr13 (Č4171) | -korozijski postojan martenzitno-feritni čelik |
| X15CrMo13 | -otporan na oksidirajuće kiseline i pri povišenim temperaturama (od 300 do 500 °C) |
| X12CrNi18-8 (Č4571) | -austenitno-feritni čelik s niskim udjelom ferita (<10%) -standardni tip čelika -primjenjiv je do 300 °C |
| X10CrNiMoTi18-10 (Č4571) | - austenitno-feritni čelik s niskim udjelom ferita (<10%) -posebno otporan na neoksidirajuće kiseline i medije s halogenidima -toplinska obrada nakon zavarivanja je nepotrebna |
| X10CrNiMoNb18-10 (Č4571) | |
| CoCrMo | -visoka mehanička svojstva -visok modul elastičnosti -dobra korozijska otpornost -biokompatibilnost (moguća toksičnost Ni iona kod CoNiCrMo legura) -visoka otpornost na umor -visoka gustoća (8,8 g/cm ³) |
| CoNiCrMo | |
| Ti6Al4V | -znatno čvršći od običnog komercijalnog titana, ali ima njegovu krutost i toplinska svojstva (osim toplinske provodljivosti, 60% je niža) -toplinski je oblikovljiv -odlična kombinacija čvrstoće i korozijske otpornosti |
| Kolagen | -biorazgradiv je i netopljiv -visoka mehanička čvrstoća -slaba rastezljivost (samo 4%) -izuzetna sposobnost hidratacije površinskih slojeva epiderma |
| Silikonska guma | -otporna na visoke i niske temperature -odlična dielektrična svojstva (električna izolacija) -odlična otpornost na vrijeme, ozon i UV zračenje |
| Polietilen (PE) | -visoka čvrstoća i modul elastičnosti, visoka otpornost na umor -dugoročna dimenzijska stabilnost -kemijski je inertan i nema otapala <u>pri sobnoj temperaturi</u> -njegovu oksidaciju uzrokuje dušična kiselina, visoke temperature i gama zračenje, |

| | |
|--|---|
| | otpornost na oksidaciju raste s većom gustoćom uslijed dužih nerazgranatih lanaca |
| Poli(metil-metakrilat) (PMMA) | -visoka čvrstoća i modul elastičnosti, visoka otpornost na umor -dugoročna dimenzijska stabilnost, dobra propusnost svijetla |
| Poli(vinil-klorid) (PVC) | -velika postojanost prema kiselinama, lužinama, i organskim otapalima (osim ketona i aromata), dobra otpornost na trošenje, postojanost oblika, toplinska postojanost do 80 °C -ne upija vodu, nepropustan za plinove, ali ne i za paru, veća molekularna masa → bolja mehan. svojstva |
| Poli(tetrafluoretilen) (PTFE) | -kombinacija visoke čvrstoće i kemijske postojanosti, dobra žilavost, izvrsna postojanost prema UV zračenju i atmosferskim utjecajima, izvrsna dielektrična svojstva |
| Poliuretan (PU) | -visoka čvrstoća i velika postojanost na uvjete okruženja (osjetljiv na jake kiseline i baze, vrelu vodu i pregrijanu paru; otporan na slabe kiseline i baze, kisik i ozon, slabe alkale, ulja, petrolej i slične materijale) |
| Poli(dimetil-siloksan) (PDMS) | -kao vulkanizirana guma ne može se rastaliti ili razgraditi, nije jako osjetljiv na bakterijske infekcije -izvrsna fleksibilnost i stabilnost |
| Kopolimeri hidroksietilmetakrilata i metakrilata | -dobra optička svojstva i visoka permeabilnost na plinove i pare |
| Celuloza | -u dodiru s vodom bubri, utoliko više ukoliko je više amorfnih područja u vlaknu -vrlo je postojana prema razblaženim kiselinama i bazama |
| Hidrogelovi | -sposobnost upijanja velikih količina vode te visoka elastičnost. |
| Kalcijev fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) | -izrazita biokompatibilnost -tvori čvrste veze s kostima |
| Aluminijev oksid (Al_2O_3) | -korozijska postojanost i inertnost, dobre mehaničke karakteristike, lomljiv -temperaturna stabilnost -visoka čvrstoća i tvrdoća -velika otpornost na trošenje |
| Keramika / polimer | -visoka biokompatibilnost i bioaktivnost |
| Cirkonijev dioksid (ZrO_2) | -bolja mehanička svojstva od aluminij-oksodne keramike -dobra kemijska i estetska svojstva te dimenzijska stabilnost |

| | |
|---------|--|
| | -visoka lomna žilavost -velika otpornost na trošenje i koroziju -visoka savojna i vlačna čvrstoća -mala toplinska vodljivost -vrlo dobra tribološka svojstva -biokompatibilnost slična titanu i njegovim legurama |
| Oxinium | -upotrebljava se za izradu umjetnih zglobova u ortopedskoj kirurgiji |

Tablica 3.2. Svojstva nekih biomaterijala [2],[4],[6]

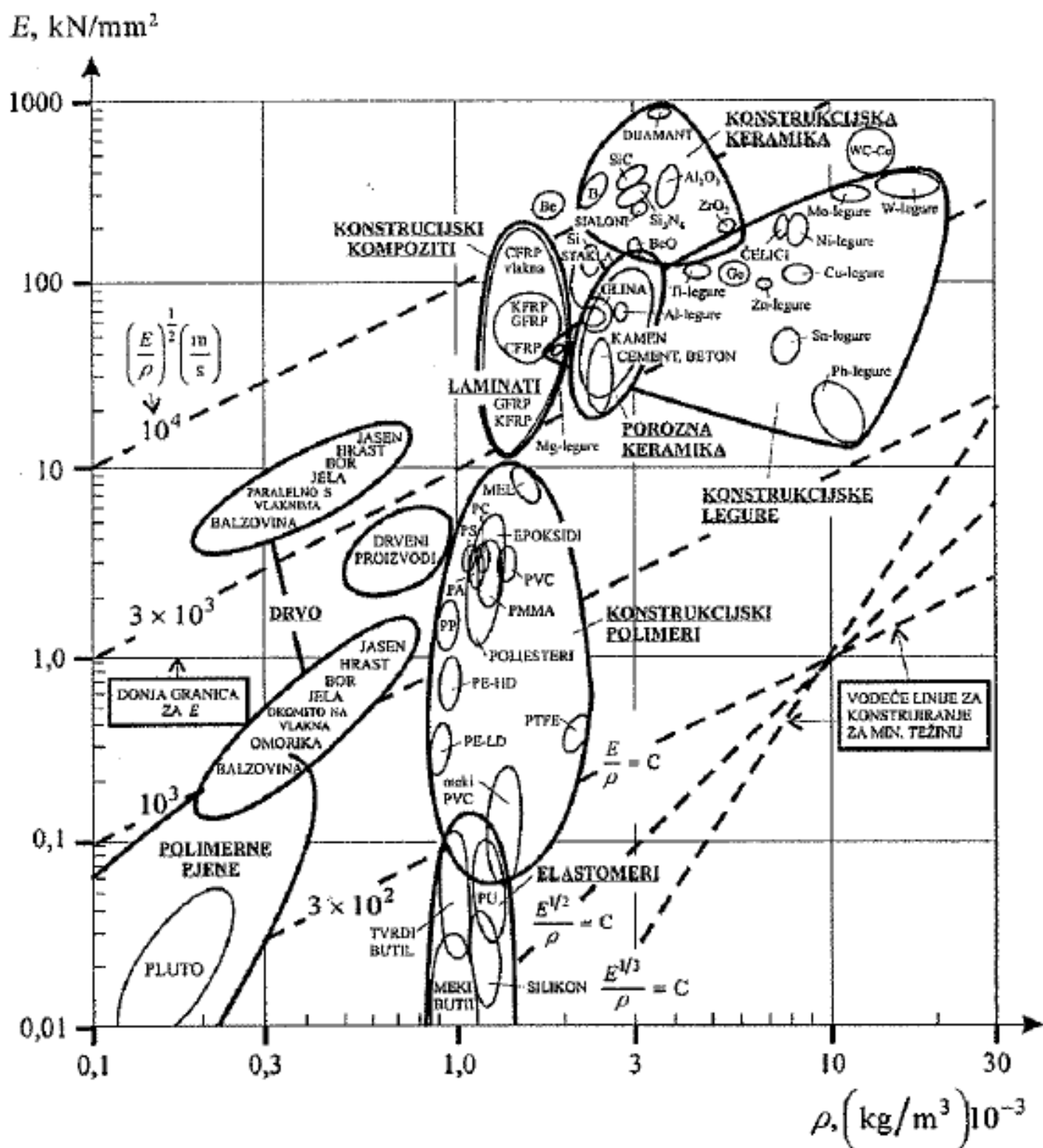
Karte svojstava materijala

Prema [3] :

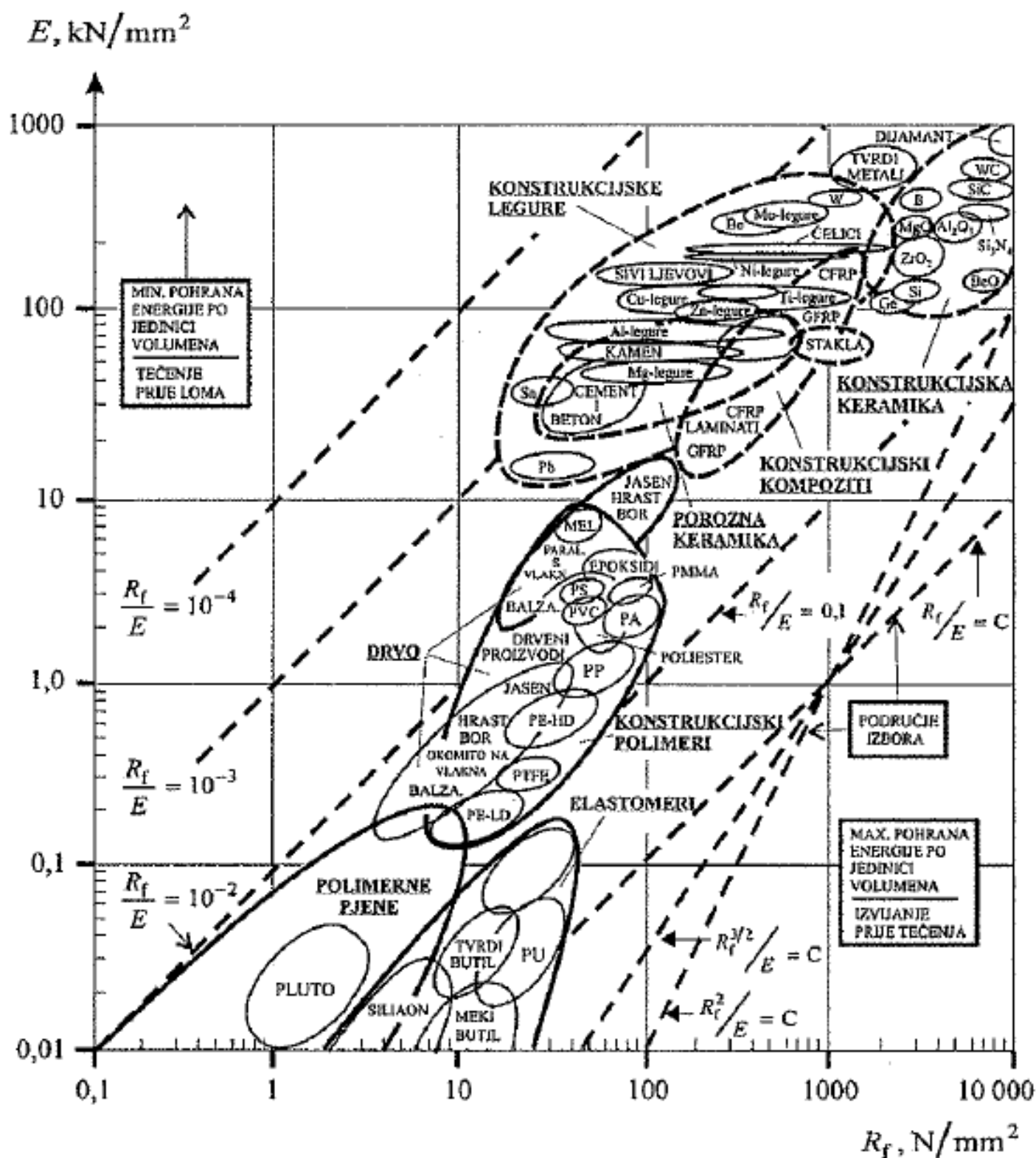
Kada se vrši uspoređivanje materijala često nije dovoljno uzeti jedno svojstvo kao kriterij vrednovanja, već je potrebno razmatrati određenu kombinaciju svojstava. Iz tog razloga razvijene su „karte svojstava“ (eng. *Material Property Charts*) gdje se u jednom dijagramu prikazuju područja okvirnih vrijednosti za nekoliko svojstava različitih skupina materijala.

One su ovdje stavljene jer prikazuju neke od gore spomenutih biomaterijala.

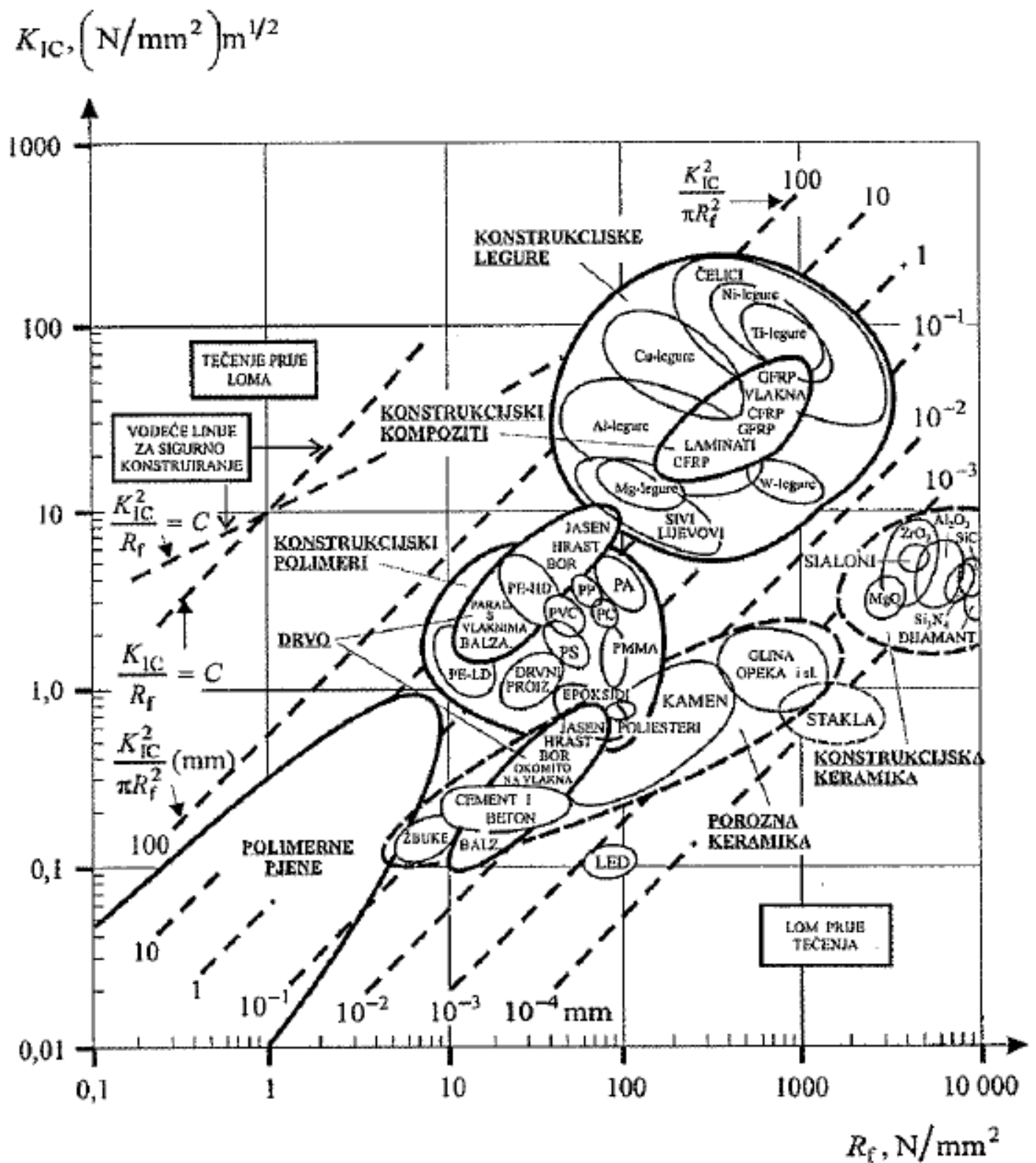
(Napomena: Svi materijali navedeni u sljedećim grafovima nisu ujedno i biomaterijali.)



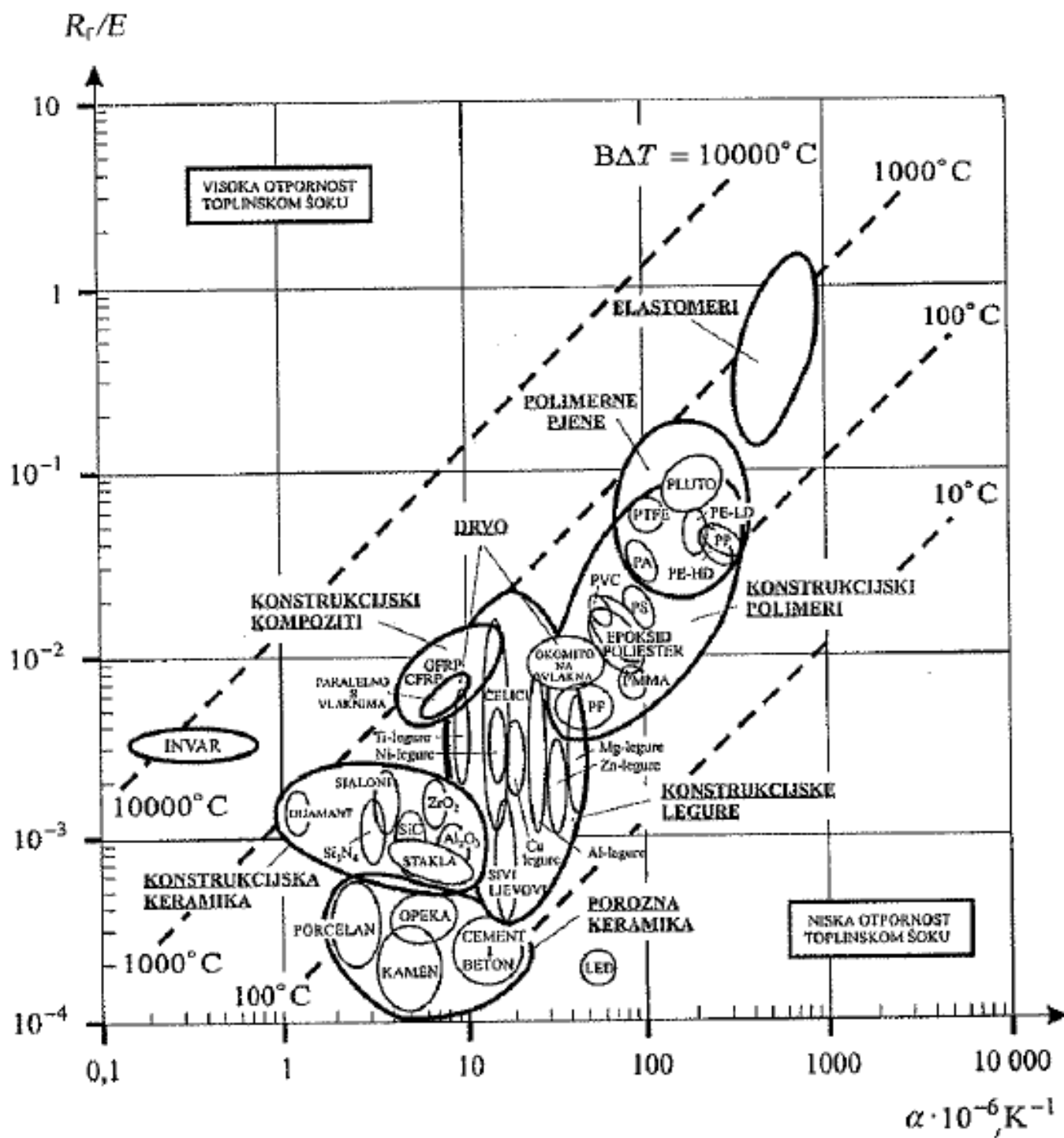
Slika 3.1. Karta svojstava za modul elastičnosti i gustoću [3]



Slika 3.2. Karta svojstava: čvrstoća-modul elastičnosti [3]



Slika 3.3. Karta svojstava: lomna žilavost-čvrstoća [3]

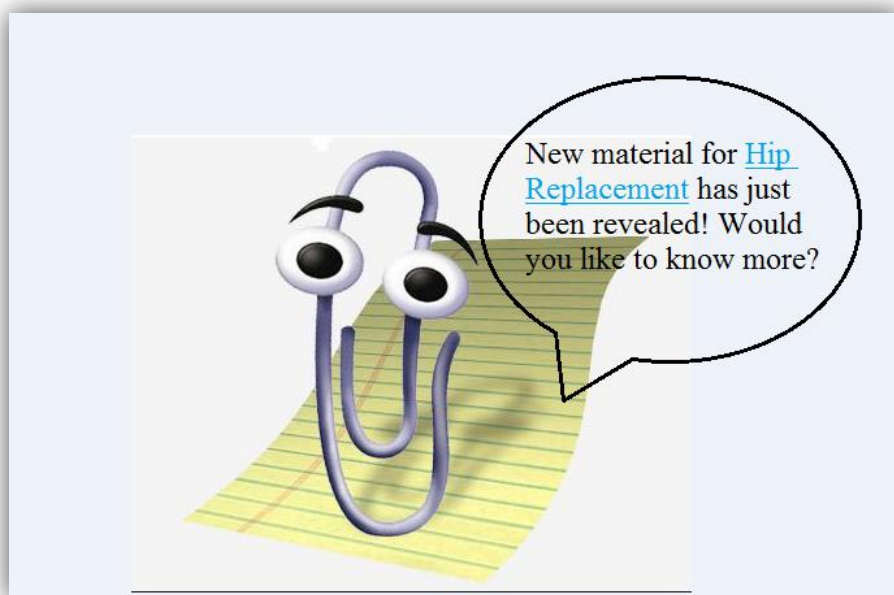


Slika 3.4. Karta svojstava: toplinska rastezljivost-normalizirana čvrstoća [3]

4. PRIMJENA U CAD OKRUŽENJU

CAD sustav (Computer Aided Design) je računalni alat za projektiranje inženjerskih proizvoda koji ima široko područje primjene. Neka od tih područja su: strojarstvo, građevinarstvo, industrijski dizajn, tekstilna industrija, elektrotehnika i električna, planiranje proizvodnih procesa i dr. Najpoznatiji CAD programski paketi koji se koriste u strojarstvu su: AutoCad, CATIA, SolidWorks, Creo, Abaqus, Mimics... Neke od mogućnosti ovih programa su 2D i 3D modeliranje, izrada tehničke dokumentacije, simulacija dizajna bez izrade stvarnog modela, prenošenje podataka na proizvodne strojeve, optimizacija rješenja i brojne druge.

Mnogi od navedenih programa sadrže u svojim bazama podataka različite konstrukcijske materijale kojima su pridodana osnovna svojstva poput Youngova modula elastičnosti (E) i Poissonova koeficijenta (ν). Na sličan način bi se mogla napraviti i baza podataka ili aplikacija u kojoj bi osim naziva različitih biomaterijala i njihovih svojstava stajala i najčešća primjena u medicinskom bioinženjerstvu što bi korisniku uvelike olakšalo odabir. Ideja bi bila da korisnik tijekom izrade svoje konstrukcije upiše u tražilicu (koja bi bila smještena u nekom od prozora alatne trake) naziv određenog biomaterijala. Nakon upisivanja i odabira materijala pojavio bi se novi prozor u kojem bi pisala njegova osnovna svojstva, primjena u medicini te okvirna cijena na tržištu. Uz navedeno aplikacija bi mogla imati opciju da sama predloži specifične materijale ukoliko bi korisnik u tražilicu umjesto naziva upisao neko željeno svojstvo, poput neke vrste ključne riječi. Tada bi iskočila lista potencijalnih biomaterijala sa ostatkom njihovih svojstava i primjene. Bilo bi zanimljivo i da za svaki stoje njegove moguće prednosti, ali i nedostaci za traženu primjenu. Također bi bilo poželjno da se aplikacija konstantno automatski nadograđuje sa najnovijim podacima kako baza podataka ne bi zastarjela. Mogla bi se uvesti i mala interaktivna animacija ili gumb koja bi javljala najnovije vijesti i zanimljive članke iz svijeta medicinskog bioinženjerstva. Nešto slično poznatoj „Wordovoj spajalici“ koja je bila prisutna u starijim izdanjima operativnog sustava „Windows“ no naravno ne bi imala pravopisnu svrhu već gore navedenu.



Slika 4.1. Interaktivna animacija [14]

Navedene mogućnosti bile bi korisne prvenstveno ozbiljnim korisnicima specijaliziranim za navedeno područje, ali bi mogle imati i tu jednu zanimljivu stranu. Naravno treba uzeti u obzir da bi programiranje takvog softvera, koji bi sadržavao sve te dodatne sadržaje uz one osnovne koje već nudi, bilo dodatno otežano te bi vjerojatno i poskupilo samu njegovu konačnu cijenu.

5. ZAKLJUČAK

Ovim radom željela se obratiti pozornost na raznolikost današnjih biomaterijala, kao i na razgranatost, odnosno raširenost njihove primjene u medicini i medicinskim konstrukcijama. Prema izvoru [1] grupa procjena uporabe biomaterijala u biomedicinskim uređajima, implantatima i protezama u SAD-u 2002. godine iznosila je: 448 000 potpunih zamjena zgloba kuka, 452 000 zamjena zglobova koljena, 24 000 zamjena zgloba ramena, 854 000 dentalnih implantata, 1 204 000 koronarnih stentova te 1 328 000 koronarnih katetera. Ovi podaci su zastarjeli više od 14 godina te su ove brojke mogle samo rasti prateći razvitak moderne biomedicine. Upravo zbog tako velike primjene biomaterijala u današnjem svijetu potrebno je znati odabrati takav materijal koji će svojim svojstvima najbolje odgovarati za određenu svrhu. Kroz rad su se pokušale navesti glavne grupe biomaterijala te njihova primjena u biomedicini. Tablično su se, prema svojstvima i primjeni dali podaci za njihov velik broj što je trebalo poslužiti kao svojevrsna vodilja za njihovu sintezu u medicinskim konstrukcijama. Može se jasno zaključiti da postoji velik broj biomaterijala koji može odgovarati za istu namjenu te da se pravilnom analizom tih materijala, njihovih mehaničkih i kemijskih svojstava, kao i njihove cijene i dostupnosti, oni mogu eliminirati ili odabrati za neku određenu medicinsku primjenu. Ta činjenica da različite skupine biomaterijala mogu imati ista ili identična određena svojstva mogu se iščitati i iz priloženih karata svojstava spomenutih i prikazanih u trećem poglavlju ovoga rada.

Valja još jednom naglasiti da ovaj rad ne obuhvaća i ne navodi sve vrste i podvrste materijala korištenih u današnjoj medicini zbog već prije navedenih razloga, te da može poslužiti inženjeru u lakšem odabiru odgovarajućeg biomaterijala traženih svojstava i primjene.

Konačno dan je i osvrt njihove primjene u CAD okruženju pri čemu je vidljivo da postoje načini primjene ovih vodilja putem programiranja spomenutih aplikacija i njihovog konstantnog održavanja novim bazama podataka što je ključno u današnjem ubrzanom razvoju biomedicinske znanosti pa tako i samih biomaterijala.

Treba svakako ponoviti da je nebrojno mnogo ljudskih života sačuvano upravo zahvaljujući biomaterijalima, a kvaliteta života milijunima drugih poboljšava se svakodnevno. Ovo područje ostaje plodno za daljnja istraživanja i izume jer ne postoji materijal koji je prikladan za sve primjene, a i nove primjene su u kontinuiranom razvoju kako sama medicina napreduje. Još je mnogo neodgovorenih pitanja vezano uz biomaterijale i njihovu ulogu u regeneraciji tkiva koja nastavljaju motivirati ljude u za njihovo daljnje istraživanje i razvoj novih, boljih medicinskih proizvoda i pomagala.

6. LITERATURA:

- [1] Enderle J.D.; Blanchard S.M.; Bronzino J.D.: Introduction to Biomedical Engineering, Second Edition, USA, San Diego, 2005.
- [2] Filetin, T.; Kovačiček, F.; Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Zagreb, 2011.
- [3] Filetin, T: Izbor materijala pri razvoju proizvoda, Zagreb, 2006.
- [4] Štefanac, I: Kompozitni materijali u stomatologiji , Zagreb, 2011.
- [5] Kladarić, I: Podjela polimeria, skripte sa predavanja
- [6] Balać I... et al.(grupa autora): Biomaterijali, Beograd, 2010.
- [7] Petrovčić, T; Pilipović, A.: Hidrogelovi, Zagreb 2012.
- [8] Gašparinčić, J: Metali, polimeri i kompoziti kao biomaterijali (završni rad), Zagreb, 2007.
- [9] Mešić, D: Aditivni postupci u medicini (završni rad), Zagreb, 2014.
- [10] https://bib.irb.hr/datoteka/563836.pdf_medicinski_vjesnik, 9.9.2016.
- [11] <https://en.wikipedia.org/wiki/Cobalt-chrome>, 7.9.2016.
- [12] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Titanij>, 7.9.2016.
- [13] <https://www.fsb.unizg.hr/geometrija.broda/700/710/gb711.htm>, 9.9.2016.
- [14] <http://www.banjaluka.com/magazin/nauka-i-tehnologija/2015/02/17/15-stvari-koje-su--obiljezile-svijet-racunara-devedesetih/>, 14.9.2016.